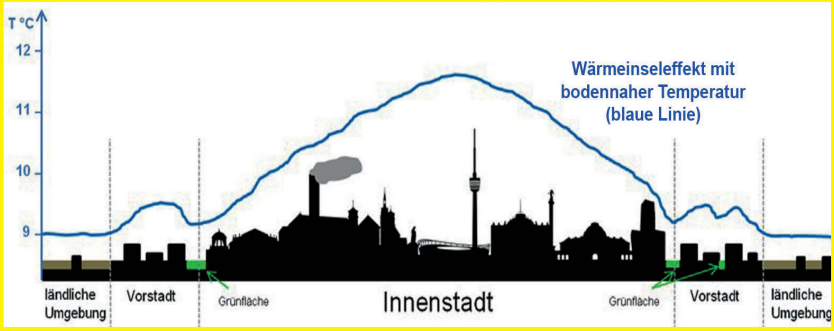
WARNSIGNAL KLIMA
Die Städte













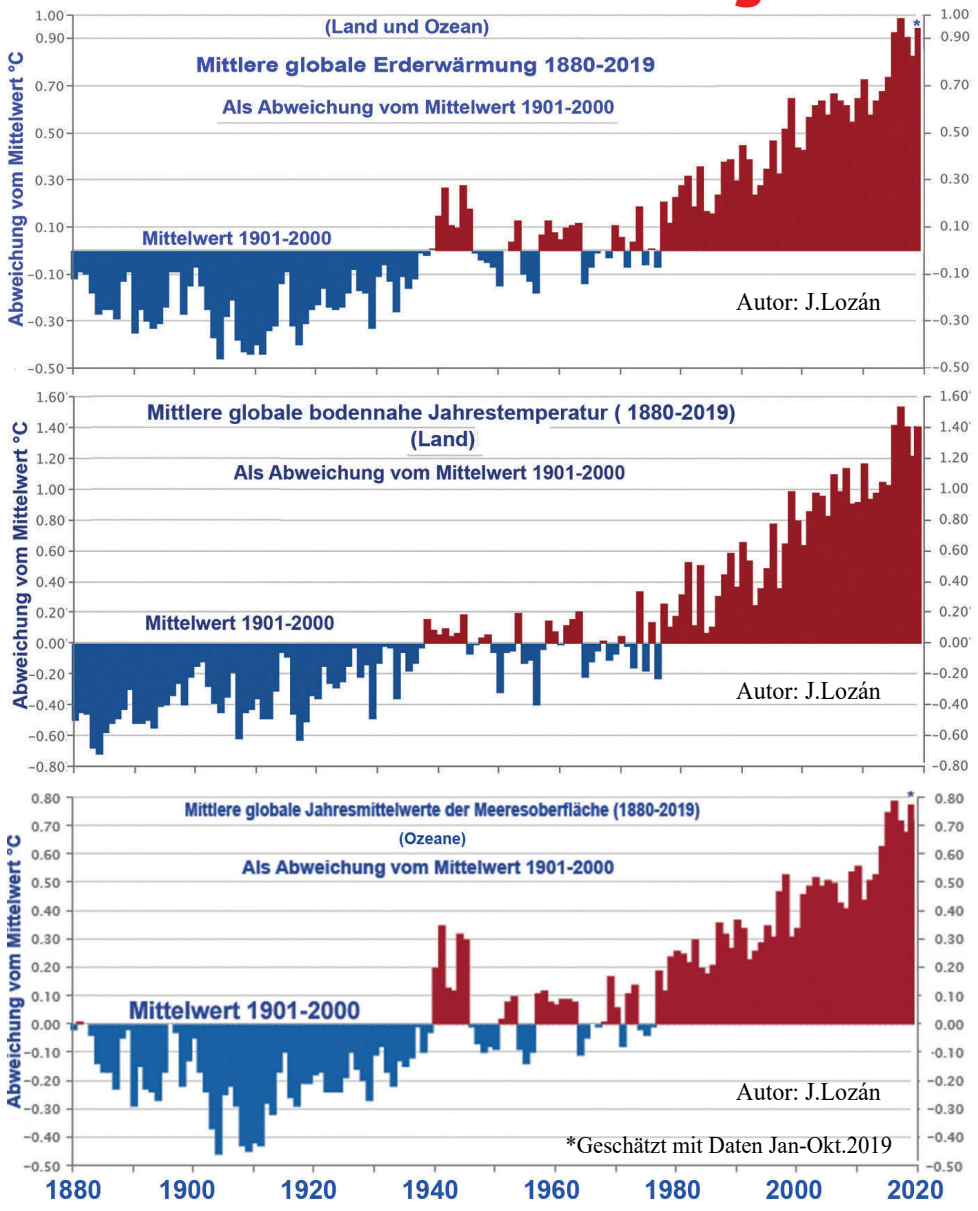


Herausgeber: José L. Lozán • Siegmar-W. Breckle • Hartmut Graßl
Wilhelm Kuttler • Andreas Matzarakis

Wissenschaftliche Auswertungen

GEO

Tafel 1: Erderwärmung

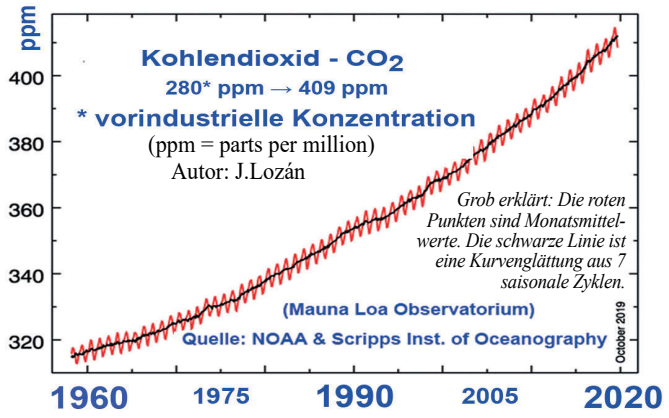


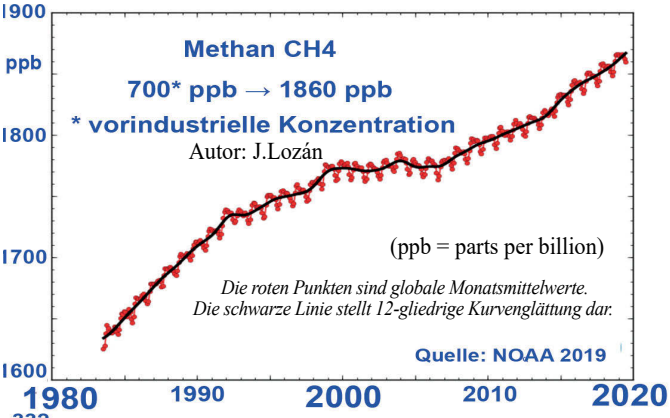
Die drei Graphiken der Temperaturzunahme für die Ozeane, das Land und für Ozeane & Land zusammen zeigen, dass sich die Erde jetzt schneller erwärmt als im 20. Jahrhundert. So sind die letzten fünf Jahre von 2015-2019 mit 0,93; 0,99; 0,91; 0,82; 0,94°C über dem langfristigen Mittelwert (1901-2000) die wärmsten seit Beginn der fast globalen Temperatur-aufzeichnung im Jahre 1880. Diese Häufung der Rekordjahre in der letzten Zeit ist ungewöhnlich und alarmierend zugleich. Im Mittel nahm die globale Lufttemperatur in 2m Höhe bezogen auf dem Mittelwert 1901-2000 von 0,08°C/ Jahrzehnt in den 1970er Jahren auf 0,60°C/Jahrzehnt in der Zeit 2000-2009 und jüngst um 0,8°C/Jahrzehnt (2009-2019) zu. Das Jahr 2019 wird höchstwahrscheinlich nach 2016 das zweitwärmste Jahr sein. Die 10 wärmsten Jahre liegen alle im Zeitraum 2005-2019. In Deutschland war das Jahr 2018 das bisher wärmste. Global ist die Erwärmung der Meeresoberfläche wegen der Durchmischung des Wassers geringer als die der Landfläche. In den Jahren 2015-2019 betrug dort die Erwärmung deshalb nur: 0,75; 0,79; 0,72; 0,68 und 0,77., dennoch die fünf wärmsten Jahre seit 1880. Die erwärmten Schichten erreichen bis jetzt meist nur einige 100 m Tiefe. Da die mittlere Ozeantiefe 3.800 m beträgt, wird die Erwärmung der Meere und damit auch die Ausdehnung des Meerwassers Jahrhunderte andauern. Die mittlere globale bodennahe Lufttemperatur (2 m) ist erheblich höher als die der Meere, da an Land nur eine dünne Schicht erwärmt wird und keine Durchmischung stattfindet. In den Jahren 2015-2019 betrug die globale Erwärmung der Luft über der Landoberfläche: 1,42; 1,54; 1,41; 1,22 und 1,41. Auch hier waren diese Jahre die fünf wärmsten seit 1880 (NOAA Daten).

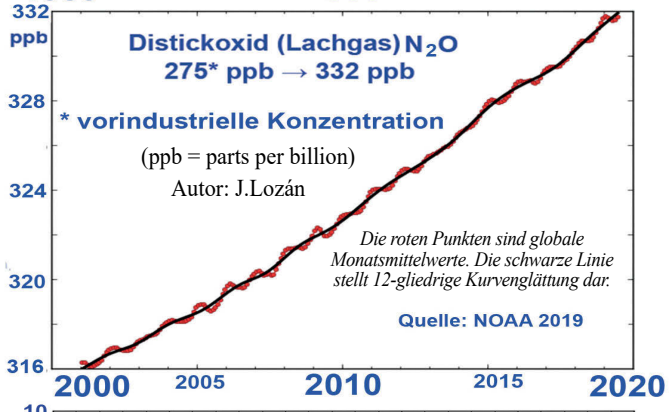
Tafel 2: Ursache der Erderwärmung

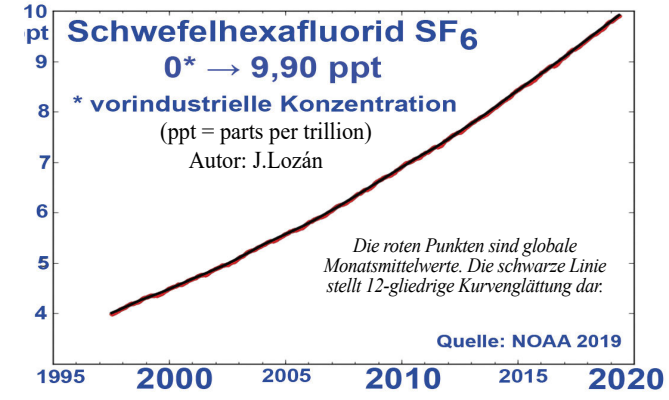
Es gibt externe Faktoren wie die elliptische Erdbahn um die Sonne, die Intensität der Sonnenstrahlung, aber auch Vulkanausbrüche und die Emission von Treibhausgasen, die das Klima der Erde beeinflussen. Darüber hinaus lassen auch interne Faktoren wie Meeresströmungen, die Zirkulation der Atmosphäre, die Änderungen der Eisgebiete und deren Wechselwirkungen das Klima kurz- und langfristig schwanken. Wir wissen, dass die Veränderungen der Erdbahn die Temperatur der Erde nur in Zeiträumen von mindestens mehreren Jahrtausenden wesentlich beeinflussen, von daher können sie nicht die Ursachen für die rasche Erwärmung der letzten 150 Jahre sein. Hochreichende Vulkanausbrüche haben nachweislich einen abkühlenden Effekt für die Erdoberfläche. Die Veränderungen der Sonnenstrahlung sind nur für einen sehr geringen Anteil der seit 1900 beobachteten Erderwärmung an der Erdoberfläche verantwortlich, seit etwa 20 Jahren hat die Sonne sogar leicht weniger intensiv gestrahlt. Mit verschiedenen Methoden konnte man zeigen, dass die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur in der Troposphäre (das sind die unteren etwa 10 bis 15 km der Atmosphäre) in entscheidendem Umfang auf die Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre zurückzuführen ist. Die klimarelevanten Gase [Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O), und Ozon (O_3)] kommen nur mit geringen Anteilen vor. Insgesamt machen sie weit weniger als 0,03% der Gasmoleküle in der Atmosphäre aus. Der besonders wichtige Wasserdampf (H_2O) hat einen Volumenanteil von 1-4%. Diese 5 Gase bewirken wegen ihrer Fähigkeit, Wärmestrahlung stark zu absorbieren, eine Erwärmung von 33 °C von -18 °C auf eine mittlere globale Oberflächentemperatur von +15 °C (natürlicher Treibhauseffekt) und ermöglichen damit überhaupt erst Leben auf der Erde. Seit Beginn der Industrialisierung haben die langlebigen unter ihnen weit über ihre natürlichen Konzentrationen hinaus zugenommen (anthropogener Zusatz zum Treibhauseffekt). Sie werden vor allem durch Verbrennung von Erdöl, Kohle und Erdgas, starke Düngung in der Landwirtschaft und Zerstörung von Wäldern frei gesetzt. Neue technische Gase wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid SF_6 sind dazu gekommen, die pro Masseneinheit besonders klimawirksam sind und den anthropogenen Treibhauseffekt verstärken. Sie sind langlebig und bleiben mindestens Jahrzehnte bis sogar Jahrtausende Jahre in der Atmosphäre.

Im Jahr 2015 lag die Konzentration des Treibhausgases Kohlendioxid (CO_2) im Jahresdurchschnitt zum ersten Mal über 400 ppm (parts per million = Teile pro Million). Zum Vergleich lag die CO_2-Konzentration aus vorindustrieller Zeit bei etwa 280 ppm. Eine Redution ist trotz der internationalen Bemühungen noch nicht erkennbar. Derzeit steigt die Konzentration von CO_2 jedes Jahr um weitere 2-3 ppm an. Ähnliche Zunahme werden in den Konzentrationen von CH_4 und N_2O beobachtet. Die Abbildungen zeigen die jeweiligen vorindustriellen Konzentrationen.









Tafel 3: STÄDTE IM KLIMAWANDEL: Wetterextreme



Hochwasser in Mumbai 2017. *https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flooding_in_Mumbai,India_2017.jpg* Lizenz: CC BY



Zerstörung von Long Beach, Mississippi als Folge des Hurricans Katrina (August 2005). Quelle: Federal Emergency Management Agency (Wikipedia, Public domain).



Okt-Nov.-2019: Erneut Brände im US-Bundesstaat Kalifornien. Das »Kinkade« Feuer (Nord-San Francisco, Bezirk Sonoma County) breitete sich auf eine Fläche von >310 Km² aus. Nach offiziellen Angaben seien 141 Wohnhäuser zerstört worden. Zeitweise haben 180.000 Anwohner die bedrohten Gebiete verlassen müssen. Nach tagelangen Stromabschaltungen waren mehr als 36.000 Haushalte im Dunkeln; zeitweise bis 1 Mio. Haushalte und Unternehmen betroffen.

Brände in Santa Clarita, Kalifornien im Okt. 2007. Fast jedes Jahr ereignen sich dort Brände. Besonders verheerend war es 2018: Viele Regionen und auch Städte waren betroffen: Die schlimmsten in der Geschichte Kaliforniens. Nach Munich Re lag der gesamtwirtschaftliche Schaden bei 24 Mrd. US-Dollar. Diese Brände waren somit nach Schadenssumme die folgenschwersten aller Zeiten. Foto: Jeff Turner. *https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wildfire_California_Santa_Clarita.jpg.Lizenz: CC BY.*

Tafel 4: Die Urbanisierung und Verstädterung nehmen zu



Hongkong. Foto L. Katzschner.

Die Anzahl und die Größe der Städte nehmen weltweit zu. Heute sind 55% Erdenbürger Städter und es werden im Jahr 2050 voraussichtlich 68% sein, bei insgesamt dann 9,5 Milliarden Menschen. Der Zuwachs wird überwiegend in Asien und Afrika auftreten. In Deutschland leben schon heute 77% in Städten, im Jahr 2050 werden es voraussichtlich 84,3% sein. Der Grund ist vor allem die Landflucht junger Menschen. Urbanisierung wird als die Ausbreitung städtischer Lebensformen definiert. »Verstädterung« dagegen meint die Ausweitung einer Stadt durch Bautätigkeit, Gewerbe- und Industrieflächen.

Tafel 5: Bevölkerungsentwicklung und Landflucht in Deutschland

Die Bevölkerungsentwicklung war in Deutschland im Zeitraum 1990-2018 sehr unterschiedlich. In den fünf neuen Bundesländern und Saarland nahm die Bevölkerung ab; in anderen Ländern wie Baden-Württemberg, Bayern, Hamburg und Schleswig-Holstein nahm sie zum Teil kräftig zu. Dies beruht fast ausschließlich auf Wanderungsgewinnen aus dem In- und Ausland, da alle Länder mit Ausnahme von Baden-Württenberg mehr Sterbefälle als Geburten aufweisen. Im Zeitraum 1990-2018 ist die Bevölkerung insgesamt um 4% gewachsen. Laut der koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung droht nun bei einer durchschnittlichen Wanderung bis 2050 ein Rückgang um 3%. Entgegen dieser mittleren Entwicklung werden Länder wie Hamburg, Berlin und Bayern weiter wachsen. Die neuen Bundesländer und Saarland werden wohl weiter schrumpfen (*Statistische Ämter des Bundes und der Länder: BiB 2019/demografie.postal.de*).

Dadurch besteht die Gefahr, dass manche Dörfer sterben werden. Ganz besonders betroffen sind Dörfer in den neuen Bundesländern, die weit weg von großen Städten liegen. Das Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung hat dies untersucht Beispielsweise sehen die Forscher im hessischen Vogelsbergkreis bei 21 Dörfern von 128 kaum eine Zukunftschance. Im Landkreis Greiz in Thüringen ist die Prognose noch schlechter; nur 19 der 196 Dörfer scheinen eine sichere Zukunft zu haben.

Um dem Problem zu begegnen, sind Bürgermeister sogar bereit Grundstücke zu verschenken, um neue Bewohner zu gewinnen. Manche Ökonomen plädieren dagegen für Umsiedlungen in Städte. Andere sehen jedoch die Abnahme der Landflucht oder sogar eine Stadtflucht bei einer konsequenten Digitalisierung (Breitband-Ausbau) im ländlichen Raum.



Heruntergekommendes Haus in Ostdeutschland (Foto Tilman2007 - aus Wikipedia, Public domain).

Gewidmet dem Andenken an unsere in diesem Jahr verstorbenen Mitherausgeber der Warnsignale-Buchreihe



Dr. Ludwig Karbe
27. April. 1933 – †16. Januar. 2019



Prof. Dr. Hartmut Kausch
9. April. 1938 – †1. Juli. 2019

Prof. Dr. Kausch war Mitherausgeber des Bands:
Warnsignale aus Flüssen & Ästuaren (1996)

Dr. Ludwig Karbe war Mitherausgeber der Bände:
Warnsignal Klima: Die Polarregionen (2006)
Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken (2008)
Warnsignal Klima: Die Meere (2011)

Herausgeber:
José L. Lozán • Siegmar-W. Breckle • Hartmut Graßl
Wilhelm Kuttler • Andreas Matzarakis

WARNSIGNAL KLIMA: Die Städte
Wissenschaftliche Fakten

Mit 239 Abbildungen, 25 Tabellen und 5 Tafeln

In Kooperation mit GEO

Wissenschaftliche Auswertungen

Adresse der Herausgeber:

Dr. José L. Lozán
Universität Hamburg
Wissenschaftliche Auswertungen
Asbrookdamm 11b • D-22115 Hamburg
JL-Lozan@t-online.de • Lozan@uni-hamburg.de

Prof. Dr. Siegmar-W. Breckle
Ökologie Bielefeld
Wasserfuhr 24 - D-33619 Bielefeld
sbreckle@gmx.de

Prof. Dr. Wilhelm Kuttler
Westpreussenstr. 56 - D-45259 Essen
wiku@uni-due.de

Prof. Dr. Hartmut Graßl
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Bundesstrasse 55 - D-20146 Hamburg
hartmut.grassl@mpimet.mpg.de

Prof. Dr. Andreas Matzarakis
Außerplanmäßiger Professor
Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung
Deutscher Wetterdienst
D-79104 Freiburg
andreas.matzarakis@dwd.de

Veröffentlicht in Kooperation mit

GEO Das Reportage Magazin • Am Baumwall 11 • D-20459 Hamburg

Gedruckt mit Unterstützung von: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit • *Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung.*

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrages, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

(c) Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg

EAN 978 3 98200672-7
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Direkte Bestellung:
Büro: »Wissenschaftliche Auswertungen«
Asbrookdamm 11b • D-22115 Hamburg
Deutschland
Tel. & Fax (+49) (0)40-4304038
Mobil: 0176-4926 1792
JL-Lozan@t-online.de • Lozan@uni-hamburg.de
www.warnsignal-klima.de
www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de
www.lozan.de

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Deutsche Bibliothek - CIP
Warnsignal Klima: Die Städte -
Wissenschaftliche Fakten
Mit 224 Abbildungen / José L. Lozán et al. (Hrsg.)
Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg
2019.EAN:978 3 98200672-7 NE:Lozán, José L. [Hrsg.]

Titelseite - Photos

Links oben: » Die Skyline von Lower Manhattan im September 2014. Autor: https://www.flickr.com/photos/barsen/15135415980/sizes/o/ - Lizenz: CC BY«, Links mitte:»Städtische Wärmeinsel-http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php? klima_waermeinsel (Mit freundlicher Genehmigung der Behörde). Links unten:» Hochwasser in Mumbai, 2017. Autor, Paasikivi (2013). Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flooding_in_Mumbai,_India_2017.jpg. Lizenz: CC BY«.

Rechts oben: »Climate change, global warming. © meryl – Fotolia«. Rechts mitte-o: »Bicycle Rush Hour Copenhagen-Winter. Foto: Mikael Colville-Andersen/geändert. https://www.flickr.com/photos/16nine/4368884246/in/photostream/«, Rechts mitte-u: »Dachgarten, Wirtschaftsgebäude Diakonissen, Klinik Augsburg« (Foto: Optigrün)«. Rechts unten: »Fassade-Begrünung Foto B. Gabriel).

Satz: Dr. J. L. Lozán (InDesign CS6)
Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Vorwort

Im Mittelpunkt des vorliegenden Buches steht die Behandlung des Stadtklimas: Ein von Menschen gegenüber dem Umland verändertes Lokalklima. Das meteorologische Element, dessen Werte sich am stärksten von denen der unbebauten Umgebung abhebt, ist die Oberflächen- bzw. Lufttemperatur. Städte sind meistens wärmer als ihr Umland. Dieser Effekt wird städtische Wärmeinsel genannt und ist von der Dichte und Höhe der Bebauung, dem Grad der Versiegelung sowie der Verteilung von Grünflächen abhängig. In großen Städten mit hoher Bevölkerungsdichte und viel Verkehr sowie ungünstigen topographischen Gegebenheiten kann die Modifikation des Lokalklimas und der Wärmeinseleffekt sehr ausgeprägt sein.

Die höheren Oberflächen- und Lufttemperaturen sind das Resultat verschiedener Effekte. Die städtische Bebauung vergrößert die urbane Oberfläche, durch die die Sonnenenergie verstärkt absorbiert wird. Dies führt zu einer Aufheizung der Baukörper, die wie eine Speicherheizung wirken und die Wärme nur langsam an ihre Umgebung abgeben. Hinzu kommen asphaltierte und betonierte Straßen, die neben der Energieabsorption die Aufnahme des Wassers aus den Niederschlägen durch den Boden behindern. Dadurch fließt das Wasser schneller ab, wodurch sich die Verdunstung und der Abkühlungseffekt verringern. Die höhere Lufttemperatur in den Städten ist auch eine Folge der Wärmeabgabe aus anthropogenen Quellen wie Heizungen, Verbrennungsmotoren, industrielle Aktivitäten usw.

Auch die atmosphärischen Spurenstoffe erreichen im Allgemeinen in den Städten höhere Werte als im Umland. Die Bebauung der Stadt mit ihren Straßenschluchten mindert die Windgeschwindigkeit und behindert dadurch teilweise den Abtransport der Luftverunreinigungen aus der Stadt. Von wenigen Ausnahmen abgesehen ist die Windgeschwindigkeit in der Stadt deutlich geringer als im Umland

Aus diesen Gründen ist die ökologische Gestaltung von Städten eine große Herausforderung. Diese Bemühungen zur Verbesserung der klimatischen und ökologischen Situation in Städten werden durch die anhaltende Landflucht und die globale Erderwärmung erschwert.

Weltweit lebten Anfang 2007 50% der Weltbevölkerung in Städten. Im Jahre 2018 ist diese Zahl auf 55% angestiegen und bis 2030 soll sie 60% betragen. In Europa ist das Phänomen Landflucht noch stärker. Über 75% der Bevölkerung der Europäischen Union leben zurzeit in städtischen Gebieten. Bis 2050 wird dieser Anteil voraussichtlich auf 82% ansteigen. Da Städte nur 2-3% der globalen Landfläche einnehmen, führt diese Entwicklung zu einer hohen Bevölkerungsdichte. In manchen Städten wie Paris, Monaco, Marrakesch, Dakka oder Macau u.a. leben etwa 20.000 Personen je Quadratkilometer. In manchen Stadtteilen dieser Städte kann die Bevölkerungsdichte sogar noch erheblich höher sein.

Trotz der oben genannten negativen Fakten ziehen die Städte den Menschen an. In Städten konzentrieren sich kulturelle, technologische und wirtschaftliche Aktivitäten. Die Versorgungslage ist meist besser als auf dem Lande, das Hunger-Risiko geringer.

Mit der Veröffentlichung dieses Buches soll ein Beitrag zu einer breiten öffentlichen Diskussion über die bestehenden und größer werdenden Probleme in Städten geleistet werden. Angesichts des Klimawandels und der zunehmenden Bevölkerung müssen neue Lösungsansätze gefunden werden, um Städte nachhaltiger zu gestalten. Die im Buch behandelten unterschiedlichen Aspekte sollen helfen, geeignete politische Entscheidungen und die notwendigen Maßnahmen zu treffen. Wie die anderen Bände dieser Buchreihe, richtet sich das vorliegende Buch nicht nur an Studierende und Wissenschaftler aller Fachrichtungen, sondern auch an interessierte Laien sowie besonders an Akteure aus Politik und Wirtschaft.

Das Buch setzt sich in sechs großen Kapiteln mit den vielfältigen Facetten des Stadtklimas auseinander. In Kapitel 1 wird das Stadtklima charakterisiert und in seinen unterschiedlichen klimatischen Facetten beschrieben. Kapitel 2 befasst sich mit der Darstellung ausgewählter Untersuchungsverfahren des Stadtklimas. Der Schwerpunkt in Kapitel 3 geht auf das Stadtklima anhand ausgewählter Beispiele in unterschiedlichen geographischen Regionen ein. Eine wichtige Ergänzung stellt Kapitel 4 dar; in dem der gesundheitlichen Aspekt beschrieben wird. Von der Modifikation des Klimas der Städte sind auch Pflanzen und Tiere in unterschiedlichem Maße betroffen. Auf diesen ökosystemaren Effekt wird in Kapitel 5 näher eingegangen. Abschließend wird in Kapitel 6 versucht, wissenschaftliche und technische Entwicklungen zur Gestaltung und Anpassung der Städte an den globalen Klimawandel herauszuarbeiten.

Die Themen dieses Buches sind bewusst breit angelegt, wodurch unterschiedliche Aspekte aus verschiedener Sicht beleuchtet werden konnten. Das Buch soll weitere Diskussionen auslösen, Empfehlungen ermöglichen und persönliche sowie politische Maßnahmen veranlassen.

Aufgrund des begrenzten Umfangs des Buches mussten sich viele Beiträge auf die grundlegenden Aspekte konzentrieren, auf weiterführende Literatur wird hingewiesen.

Das Buch ist eine breite Gemeinschaftsleistung. Es dient der Erfüllung der Pflicht der Wissenschaftler, die Öffentlichkeit fundiert, kritisch und allgemeinverständlich über gesellschaftlich relevante Themen zu informieren. Den Verfassern sind wir zu Dank verpflichtet, den Gutachtern für die kritische Durchsicht der Texte und Anregungen zu deren Verbesserung.

Durch eine finanzielle Unterstützung seitens des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenfoschung ist es möglich, das Buch zusammen mit anderen Bänden dieser Reihe, auch elektronisch auf unserer Webseite: *www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de* oder *www.warnsignal-klima.de* zu veröffentlichen.

Die Herausgeber
Hamburg – Bielefeld – Essen - Freiburg

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 5

Listen der Autoren und Gutachter 9

Die Städte im Klimawandel (José L. Lozán, Siegmar-W. Breckle, Hartmut Grassl, Dieter Kasang & Andreas Matzarakis) 11

1 Charakterisierung des Stadtklimas 21

1.1 Stadtklima: Einführung, Charakteristika, Nachweismöglichkeiten (Wilhelm Kuttler) 21
1.2 Zur Geschichte der Stadtklimatologie (Wilhelm Kuttler) 28
1.3 Vertikale Gliederung der Stadtatmosphäre (Andreas Christen) 36
1.4 Variabilität von meteorologischen Parametern in Städten (Andreas Matzarakis & Andreas Christen) 43
1.5 Bedeutung der Kaltluft und Ventilation in Städten (Lutz Katzschner & Sebastian Kupski) 48
1.6 Anforderung an eine nachhaltige Stadt (Hilmar von Lojewski) 53

2 Stadtklima: Untersuchungsmethoden 62

2.1 Methoden zur Bestimmung stadtklimatischer Parameter und deren Belastbarkeit (K. Heinke Schlünzen, Frank Harms & Sarah Wiesner) 62
2.2 Einsatz von Satelliten zur Analyse des Stadtklimas (Benjamin Bechtel, Susanne A. Benz & Andreas Wicki) 66

3 Stadtklima unterschiedlicher Regionen weltweit 74

3.1 Stadtklimauntersuchungen in ausgewählten deutschen Städten (Petra Fuchs) 74
3.2 Küstenstädte - das Beispiel New York (Dieter Kasang) 82
3.3 Städtische Agglomerationen in Flussdeltagebieten (Jürgen Scheffran & P. Michael Link) 91
3.4 Risikolebensraum Kathmandu (Nepal): Klima- und Umweltveränderungen im Urbanisierungsprozess einer Himalaya-Metropolregion (Udo Schickhoff) 99
3.5 La Paz, als Großstadt in Beckenlage in 3200-4000 m Höhe (Dirk Hoffmann) 106

4 Gesundheitliche Gefährdungen in Städten 113

4.1 Der Einfluss urbaner Hitze auf die menschliche Gesundheit (Juliane Kemen & Thomas Kistemann) 113
4.2 Städtische Luftqualität im Klimawandel (Markus Quante, Volker Matthias & Martin Ramacher) 120
4.3 Gesundheitliche Bedeutungen von Partikelbelastungen (Jobst Augustin) 128
4.4 Gesundheitsrelevante Temperatur-Ozon-Ereignisse am Beispiel Bayern (Elke Hertig) 133
4.5 Zecken in der Stadt (Lidia Chitimia-Dobler & Gerhard Dobler) 141
4.6 Hantaviren: Eine potenzielle Gefahr als Folge der Erderwärmung? (José L. Lozán & Sandra Essbauer) 147
4.7 Hitzewellen und Hitzewarnungen in Städten (Kathrin Graw, Stefan Muthers & Andreas Matzarakis) 152

5 Veränderungen städtischer Ökosysteme 159

5.1 Pflanzenreaktionen auf das Stadtklima (Katharina Schmidt & Hans-Helmut Poppendieck) ____ 159
5.2 Klimawandel und invasive gebietsfremde Arten in Städten (Thomas Steinlein) ____ 166
5.3 Veränderungen von Flora und Fauna in Frankfurt am Main in den letzten 200 Jahren (Georg Zizka & Indra Starke-Ottich) ____ 170
5.4 Stadt und Land - Gewässer im Wandel (Heike Zimmermann-Timm & Katrin Teubner) ____ 174
5.5 Wasserknappheit in Megastädten am Beispiel Lima (Christian León & Hannah Kosow) ____ 182
5.6 Entwicklung der Weltbevölkerung, Megacities und Landflucht (José L. Lozan, Siegmar-W. Breckle & Hartmut Grassl) ____ 188

6 Was muss getan werden: Gestaltung und Anpassung sowie Klimaschutz in Städten 196

6.1 Planungsrechtliche Instrumente zur Umsetzung von Klimawandel-anpassungsmaßnahmen (Nicole Baumüller) ____ 196
6.2 Grüne Infrastruktur zur Anpassung an den Klimawandel in Städten (Jürgen Baumüller) ____ 203
6.3 Einfluss von Bauwerksbegrünung und Wohnumfeldgrün auf die menschliche Gesundheit (Sandra Meyer, Ben Gabriel, Rainer vom Lehn & Peter-Diedrich Hansen) ____ 213
6.4 Anpassung an den Klimawandel in Städten: Herausforderungen und Politikinstrumente (Petra Mahrenholz & Andreas Vetter) ____ 221
6.5 Maßnahmen zur Hitzestress-Reduzierung anhand Verdunstungsabkühlung (Bernd Kirschbaum, Heiko Sieker, Ruth Steyer, Björn Büter, Dominika Leßmann, Robert von Tils, Carlo Becker & Sven Hübner) ____ 227
6.6 Paradigmenwechsel im Umgang mit dem Regenwasser in wachsenden Städten (Christian Günner, Franziska Meinzinger & Andreas Kuchenbecker) 233
6.7 Verbesserung der Lufthygiene und Verringerung des Lärms in Städten (Susanne Schubert, Annett Steindorf & Johanna Appelhans) ____ 240
6.8 Klimaneutralität im Gebäudebestand bis 2050 - Wie geht das? (Burkard Schulze-Darup) ____ 247
6.9 Entwicklung des Gebäudeenergiebedarfs und Einsparziele in Deutschland und in verschiedenen Ländern Asien (Dirk Schweden) ____ 255
6.10 Planerische Maßnahmen zur Reduzierung von lokalem Hitzestress für Menschen (Hyunjung Lee & Helmut Mayer) ____ 263
6.11 INKAS - ein vielseitiges Beratungswerkzeug für die Stadtentwicklung (Saskia Buchholz) ____ 269
6.12 Entwicklung geeigneter Stadtstrukturen in verschiedenen Klimazonen (Sebastian Kupski & Lutz Katzschner) ____ 275
6.13 Stadtstruktur und Klimawandel: Warum sind urbane Transformation so schwierig zu gestalten? (Jürgen P. Kropp) ____ 280
6.14 Voraussetzung für einen wirksamen Klimaschutz: Die Verkehrswende in den Städten (Weert Canzler) ____ 286
6.15 Mehr Bildung für einen besseren Klimaschutz ? (Heike Zimmermann-Timm) ____ 293

7 Sachregister 300

Listen der Autoren und Gutachter

Autoren

Johanna Appelhans, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Jobst Augustin, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Jürgen Baumüller, Stuttgart
Nicole Baumüller, Stuttgart
Benjamin Bechtel, Geographisches Institut, Ruhr-Universität Bochum
Carlo Becker, bgmr Landschaftsarchitekten GmbH, Berlin
Susanne A. Benz, School of Global Policy and Strategy, University of California San Diego (USA)
Rebekka Berninger, HafenCity Universität Hamburg
Siegmar-W. Breckle, Ökologie Bielefeld
Saskia Buchholz, Deutscher Wetterdienst - Offenbach
Björn Büter, GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover
Weert Canzle, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH
Lidia Chitimia-Dobler, Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München
Andreas Christen, Umweltmeteorologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Udo Dietrich, HafenCity Universität Hamburg
Gerhard Dobler, Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München
Sandra Essbauer, Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München
Petra Fuchs, Deutscher Wetterdienst - Freiburg
Ben Gabriel, Real Estate Management, Technische Universität-Berlin
Hartmut Grassl, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
Kathrin Graw, Deutscher Wetterdienst - Freiburg
Christian Günner, Hamburg Wasser
Peter-Diedrich Hansen, Institut für Ökologie, Technische Universität, Berlin
Frank Harms, Meteorologisches Institut, CEN - Universität Hamburg
Elke Hertig, Medizinische Fakultät, Universität Augsburg
Peter Hoffmann, Climate Service Center, Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Dirk Hoffmann, Gutachter und Berater, Berlin
Sven Hübner, bgmr Landschaftsarchitekten GmbH, Berlin
Dieter Kasang, Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg
Lutz Katzschner, Umweltmeteorologie, Universität Kassel
Juliane Kemen, Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit, Universität Bonn
Bernd Kirschbaum, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Thomas Kistemann, Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit, Universität Bonn
Hannah Kosow, Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung, Universität Stuttgart
Jürgen Peter Kropp, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
Andreas Kuchenbecker, Hamburg Wasser
Bejamin Kupski, INKEK GmbH
Wilhelm Kuttler, Universität Essen-Duisburg
Hyunjung Lee, Amt für Umweltschutz, Stuttgart
Dominika Leßmann, GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover
Rainer vom Lehn, Real Estate Management, Technische Universität-Berlin
P. Michael Link, Institut für Geographie, CEN - Universität Hamburg
Christian León, Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung, Universität Stuttgart
Hilmar von Lojewski, Deutscher Städtetag, Berlin
José L. Lozán, Biozentrum Grindel, Universität Hamburg
Petra Mahrenholz, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Volker Matthias, Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Andreas Matzarakis, Deutscher Wetterdienst - Freiburg
Franziska Meinzinger, Hamburg Wasser
Helmut Mayer, Umweltmeteorologie, Universität Freiburg
Sandra Meyer, Real Estate Management, Technische Universität-Berlin
Stefan Muthers, Deutscher Wetterdienst - Freiburg
Hans-Helmut Poppendieck, Botanischer Verein zu Hamburg e.V.
Markus Quante, Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Martin Ramacher, Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Jürgen Scheffran, Institut für Geographie, CEN - Universität Hamburg
Udo Schickhoff, Institut für Geographie, CEN - Universität Hamburg
Katharina Schmidt, NABU, Hamburg
K. Heinke Schlünzen, Meteorologisches Institut, CEN - Universität Hamburg
Susanne Schubert, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Burkard Schulze-Darup, schulze darup & partner architekten, Berlin
Dirk Schweden, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
Heiko Sieker, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH, Hoppegarten
Indra Starke-Ottich, Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum Frankfurt
Annett Steindorf, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Thomas Steinlein, Fakultät für Biologie, Universität Bielefeld
Ruth Steyer, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH, Hoppegarten
Katrin Teubner, Abt. Limnologie und Biologische Ozeanographie, Universität Wien (Österreich)
Robert von Tils, GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover
Andreas Vetter, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Andreas Wicki, MCR Universität Basel und GEO Partner AG (Schweiz)
Sarah Wiesner, Meteorologisches Institut, CEN - Universität Hamburg
Heike Zimmermann-Timm, Institut für Ökologie, Universität Frankfurt am Main
Georg Zizka, Senckenberg Biodiversität und Klima Forschungszentrum, Frankfurt am Main

Gutachter

Dr. Jobst Augustin, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Prof. Dr. i. R. Jürgen Baumüller, Stuttgart
Dr. Rüdiger Berghahn, exUmweltbundesamt, Berlin
Prof. (emeritiert) Dr. Siegmar-W. Breckle, Ökologie Bielefeld
Prof. (emeritiert) Dr. Hartmut Grassl, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
Prof. (emeritiert) Dr. Peter-Diedrich Hansen, Institut für Ökologie, Technische Universitaet Berlin
Prof. Dr. Elke Hertig, Medizinische Fakultät, Universität Augsburg
Prof. (emeritiert) Dr. Peter Hupfer, Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin
Dr. Christian Imholt, Julius Kühn-Institut (Münster)
Dr. Dieter Kasang, Deutsches Klimarechenzentrum GmbH
Prof. (emeritiert) Dr. Wilhelm Kuttler, Universität Essen-Duisburg
Dr. José L. Lozán, Biozentrum Grindel, Universität Hamburg
Prof. Dr. Andreas Matzarakis, Z. für Medizin-Meteorologische Forschung Deutscher Wetterdienst
Prof. i.R. Dr. Helmut Mayer, Umweltmeteorologie, Universität Freiburg
Prof. Dr. Markus Quante, Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Dr. Eike Rachor, exAlfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Dr. Daniela Reil Julius Kühn-Institut (Kleinmachnow)

Städte im Klimawandel

Lozan, J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl, D. Kasang & A. Matzarakis

Städte weisen im Vergleich zu ihrem Umland erhebliche klimatische Unterschiede auf. Es herrschen in Städten andere Temperatur-, Wind-, Niederschlags- und Luftfeuchtigkeitsverhältnisse als in ihrem Umland. Wie intensiv die Unterschiede sind, ist nicht nur von der Größe der Stadt und der geographischen Lage, sondern auch von mehreren anderen Faktoren abhängig. Hierzu gehören der Bodenversiegelungsgrad, die Emission von Abwärme, Luftverunreinigungen durch Haushalte, Verkehr und Industrie sowie die Verteilung und Dichte bebauter Flächen.

Das Stadtklima ist von der WMO (*World Meteorological Organization*) als gegenüber dem Umland anthropogen verändertes Lokalklima definiert. Aufgrund der Bevölkerungsentwicklung werden die Städte größer, und damit nimmt auch der klimatische Unterschied zwischen Stadt und Umland zu.

Der städtische Wärmeinseleffekt

Die Lufttemperaturdifferenz zwischen der wärmeren Stadt und ihrem kühleren Umland erreicht ihren höchsten Wert bei wolkenfreien und windschwachen Bedingungen während der Nacht. Dieser Effekt wird städtische Wärmeinsel genannt (*Abb. 1*). Die Differenz kann in großen Städten mehrere °C betragen (*Abb. 2*). Der Temperaturunterschied hängt von mehreren Faktoren ab. Die Bebauungsart der Stadt ist von Bedeutung. Die Gebäude vergrößern die urbane Oberfläche, auf der die Sonnenstrahlung absorbiert wird. Dies führt zu einer Aufheizung der Baukörper, die wie eine Speicherheizung wirken, die nachts nur langsam ihre Wärme abgibt. Die aufgenommene Wärmemenge ist auch von der Helligkeit der Fassaden abhängig. Dunkle Fassaden nehmen mehr Wärme als helle auf. Beschattungen durch Fassaden- und Dachbegrünung verringern die Absorption der Sonnenstrahlung. Die thermischen Besonderheiten der Bausubstanz, der Strahlungseigenschaften der Oberflächen und die anthropogene Wärmefreisetzung sind sehr unterschiedlich. Beton hat eine etwa 10× höhere Wärmeleitfähigkeit und 1,5× höhere Wärmekapazität als Ziegelsteine.

Aufgrund der zahlreichen Strömungshindernisse und der Einengung durch Straßenschluchten wird die Windgeschwindigkeit reduziert (*Abb. 3*) und damit der Wärmeabtransport verringert oder teilweise unterbunden. Dadurch kann sich die Luft in der Stadt nicht so schnell abkühlen, wodurch der Wärmeinseleffekt verstärkt wird. Allerdings zeigt das Mikroklima der Stadt aufgrund der Bebauungsstrukturen eine hohe räumliche Variabilität. So können durch Wirbelbildung zwischen Gebäuden und an Hausecken lokal böige Winde mit erhöhten Windgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten auftreten.

Im Umland können die wenigen Baukörper und der gering versiegelte Boden ihre gespeicherte Wär-

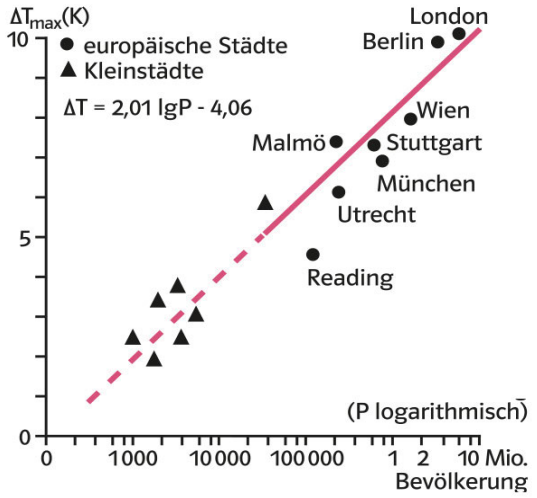


Abb.2: *Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland in europäischen Städten. Je größer die Stadt, desto größer der Unterschied (aus: MVI: Städtebauliche Klimafibel. Stuttgart 2012; Boundary layer climates (Second edition). By T. R. Oke. Methuen. 1987).*

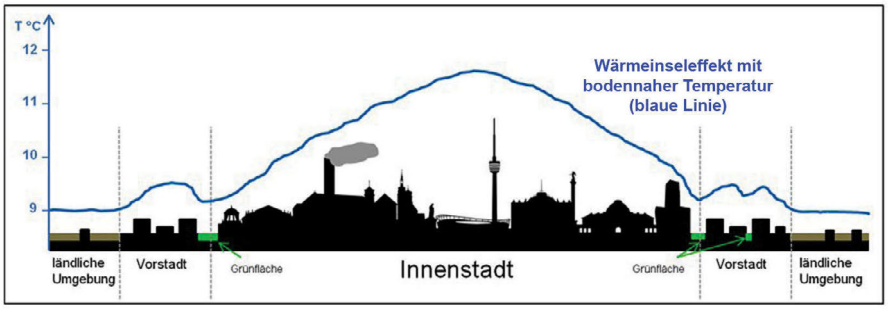


Abb. 1: *Schematische Darstellung des städtischen Wärmeinseleffekts mit der bodennahen Temperatur (blaue Linie). Quelle: Stadt Stuttgart (mit freundlicher Genehmigung der Stuttgarter Behörde).*

me leichter wieder abgeben, und die Abkühlung erfolgt daher nachts schneller. Demgegenüber sind die Temperaturen auf den Straßen in der Innenstadt nachts viel höher als im Umland. Tagsüber sind die Unterschiede wegen der besseren Durchmischung der unteren Atmosphäre sowohl im Winter als auch im Sommer kleiner. In Hamburg ist z.B. die mittlere Temperatur tagsüber ca. 0,5 °C höher als außerhalb der Stadt. Nachts können die Unterschiede im Sommer 2 °C betragen. Bei Hitzewellen kann der Unterschied deutlich höhere Werte erreichen.

Die großräumige Bodenversiegelung der Innenstädte trägt ebenfalls zur Erwärmung bei. Die asphaltierten oder betonierten Straßen absorbieren die Sonnenstrahlung, wirken ebenfalls wie eine Speicherheizung, und vor allem verhindern sie das Versickern des Regenwassers. Das Niederschlagswasser fließt schneller ab, und dadurch verringert sich die Verdunstung. Da Verdunstung der Umgebungsluft Wärme entzieht, bedeutet der schnelle Abfluss eine geringere Abkühlung der Stadt. Dadurch verringert sich auch die Luftfeuchte. Städte weisen überwiegend niedrigere Werte auf als das Umland. Die höheren Temperaturen in den Städten bewirken auch, dass der Schnee im Winter viel kürzer in den Städten liegen bleibt als im Umland. Messungen in Berlin haben ergeben, dass der Schnee im Mittel 9 Tage kürzer in der Stadt liegt als im Umland.

Gelegentlich jedoch, insbesondere bei schwachem Wind, ist die Feuchte im Stadtgebiet im Vergleich zum Umland erhöht, weil im urbanen Bereich der Taupunkt seltener erreicht wird als im Umland. Man spricht dann von einem städtischen Feuchteüberschuss (s. Kap. 1 - in diesem Band).

Temperaturentwicklung in großen Städten

In sehr großen Städten ab 5 Mio. Einwohnern haben sich die höchsten Jahrestemperaturen in den letzten 50 bzw. 30 Jahren deutlich stärker erhöht als in den Regionen, in denen die Städte liegen (Papalexiou 2018). Paris, Houston, Moskau und Harbin weisen z.B. einen Anstieg von fast 1 °C pro Jahrzehnt auf (*Abb. 4*), während die mittlere globale Zunahme bei nur 0,2 °C/Jahrzehnt lag. Als eine wichtige Ursache wird der städtische Wärmeinseleffekt angenommen, der besonders nachts zu ca. 1,2-4,0 °C höheren Temperaturminima führt. Schon bei einer weiteren globalen Erwärmung um 1,5 °C würden um 2050 doppelt so viele Megastädte und 350 Mio. Menschen mehr als heute extremer Hitze ausgesetzt sein. Eine außergewöhnliche Hitzewelle, wie sie Karatschi und Kalkutta 2015 erfahren haben, könnte bei einer mittleren Erwärmung um 2 °C dort sogar jährlich auftreten (WBGU 2016).

Hohe Sterblichkeit durch Hitzewelle

Hitzewellen beeinträchtigen die Gesundheit des Menschen, die Natur und die Wirtschaft. Langanhaltende Wärmebelastung führt zu ansteigenden Sterberaten beim Menschen. Als Folge der Erderwärmung nimmt seit den letzten Jahrzehnten nachweisbar sowohl die Anzahl der heißen Tage als auch die der Hitzewellen zu. Bei weiterer Erwärmung wird die Anzahl der Hitzewellen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts noch weiter zunehmen. Die Folgen des Hitzesommers 2003 mit über 70.000 zusätzlichen Todesfällen sowie die mit großräumigen Torf- und Waldbränden einhergehende Hitzewelle 2010 in Russland mit geschätzten 55.000 zusätzlichen Todesfällen zeigen deutlich die Anfälligkeit vor allem der älteren Personen gegenüber Hitzebelastung.

Studien zeigen, dass die Sterblichkeitsrate während der Hitzewelle in den Städten meist höher ist als im Umland. Dies wird mit der geringen Abkühlung nachts in den Städten im Vergleich zum Umland erklärt. Die Anzahl von tropischen Nächten (Minimumtemperatur >20°C) kann sehr unterschiedlich sein. So lag diese Zahl in der Innenstadt von Essen im Jahr 2012/13 bei 11 Tagen und in einem Vorort nur bei 2 Tagen. Dies führte zu signifikant höheren Sterberaten in großen Städten (Kuttler 2018).

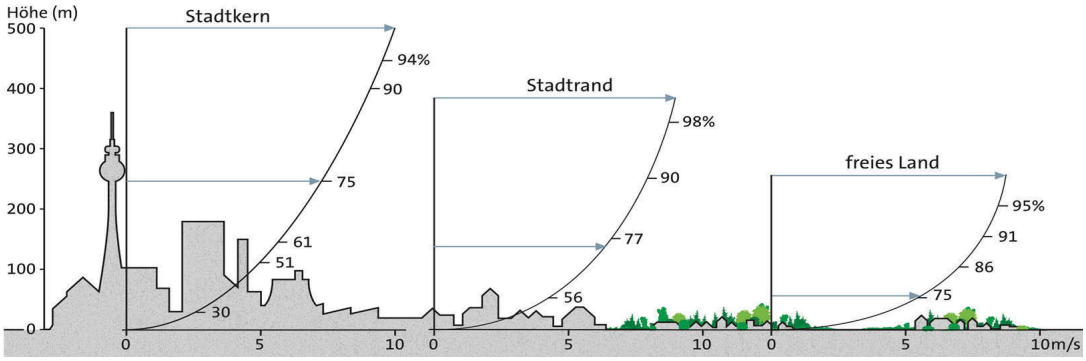


Abb. 3: *Abnahme der Windgeschwindigkeit vom Stadtrand zum Stadtkern aufgrund der Bodenrauigkeiten. Über dem Kern größerer Städte wird die Geschwindigkeit der freien Strömung erst in einigen hundert Metern Höhe erreicht (bei diesem Beispiel 90% der freien Windgeschwindigkeit in ca. 400 m. (Aus: Baumbach 1991: https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d403_01.htm. Springer Verlag, Berlin).*

Städte an der Grenze der Bewohnbarkeit

Im Nahen Osten herrschen im Sommer sehr hohe mittlere Tagestemperaturen. Für den Zeitraum 2010 bis 2018 lagen in einigen Städten die mittleren Tagestemperaturen im Sommer im Bereich um 43 °C (z.B. Mogayra, Saudi-Arabien; Kuwait City und Jahra, Kuwait; Nasiriya, Irak; Minab, Iran). Auch Temperaturen über 50 °C kommen vor, wie z.B. am 29. Juni 2017 in Ahwaz (Iran) mit einer Tageshöchsttemperatur von 53,7 °C (NOAA *National Climatic Data Center* 2018) oder am folgenden

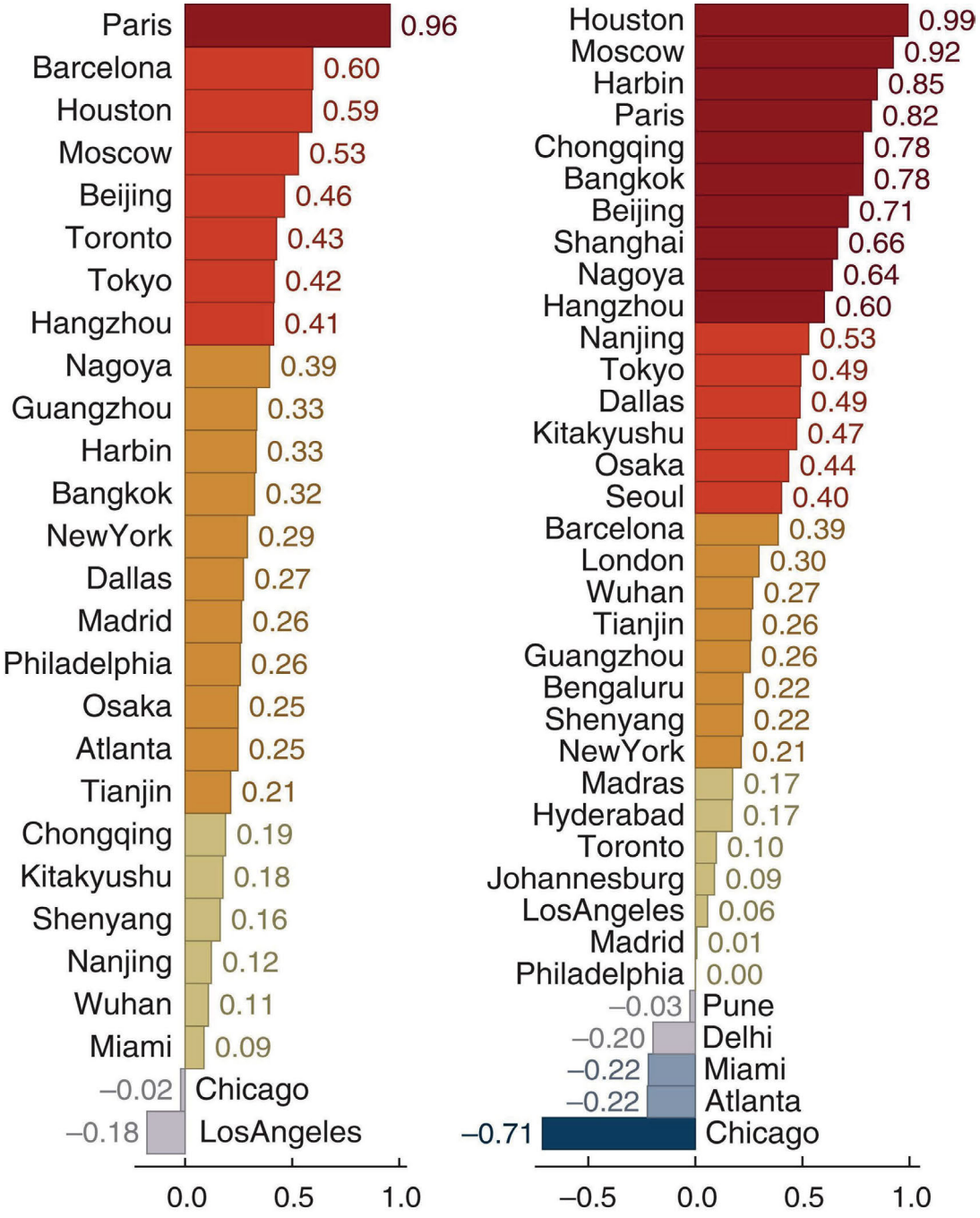


Abb. 4: *Trends der höchsten Jahrestemperatur in großen Städten ab 5 Mio. Einwohnern in °C pro Jahrzehnt für die beiden Perioden 1966-2015 (links) und 1986-2015 (rechts) (Papalexiou et al. 2018, Lizenz: CC BY-NC-ND).*

Tag in Basra im Irak mit 53,9 °C (UN News 2016). Lebensbedrohlich werden hohe Temperaturen in Kombination mit hoher Luftfeuchtigkeit, weil Kühlung durch Schwitzen nur begrenzt möglich ist. Die tiefste Temperatur, welche sich durch Verdunstung erreichen lässt, ist die sogenannte Kühlgrenztemperatur. Sie muss zum Überleben unter der Bluttemperatur liegen. Eine solche fast lebensbedrohende Situation war z.B. am 20. Juli 2017 in Jask (Iran) bei einer mittleren Tagestemperatur von 35,3 °C und einer mittleren relativen Luftfeuchte von 84% gegeben (NOAA National Climatic Data Center 2018). Demgegenüber sind sehr heiße Tage mit geringer Luftfeuchte weniger belastend. Ist zudem nachts die Abkühlung gering, belastet dies den Organismus zusätzlich, da Erholungsphasen ausfallen. So wurde am 27. Juni 2017 in Khasab (Oman) die höchste jemals gemessene Minimumtemperatur mit 44,2 °C verzeichnet (Krummenauer & Kropp 2018).

Es ist unzweifelhaft, dass vor allem der Mensch der Treiber der Klimaerwärmung ist und dass die zukünftigen klimatischen Bedingungen in den o.g. Regionen durch noch heißere Sommer charakterisiert sein werden. Bei Annahme eines optimistischen Klimaszenarios mit einer mittleren globalen Erwärmung von nicht mehr als 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter (1850-1900) können die o.g. Regionen in den Jahren von 2071 bis 2100 mit einer Zunahme der durchschnittlichen Sommertemperaturen um 2,5 bis 3 °C rechnen.

Gesundheitsrisiken durch Luftverunreinigung

Mit der zusätzlichen Wärmebelastung und der beobachteten höheren Luftverunreinigung in Städten (*Abb. 5*) potenziert sich die Beeinträchtigung der Gesundheit des Menschen. Das ist eines der wichtigsten urbanen Umweltprobleme weltweit. Hohe Temperaturen treten meist bei einer austauscharmen Witterungsepisode mit Windschwäche auf. Aufgrund der oft gleichzeitig herrschenden Wolkenlosigkeit wird durch die dann hohe Ultraviolett-Strahlung und die hohe Luftverunreinigung die fotochemische Ozonproduktion angeregt. Zu diesen chemischen Umwandlungen kommt eine intensivierte Pollenproduktion bestimmter Pflanzen hinzu, die noch dazu durch erhöhte CO_2-Konzentration wie auch durch höhere Wärme gesteigert werden kann. Nach Zizka et. al. 2003 wird bei hohen Lufttemperaturen und CO_2-Konzentrationen eine Zunahme allergieauslösender Proteine in Ambrosiapollen festgestellt. Ein weiteres Beispiel ist eine erhöhte Produktion eines allergieauslösenden Proteins bei Birkenpollen bei erhöhter NO_x-Konzentration (Pöschl 2005).

Nach der Weltgesundheitsorganisation gilt die Luftverschmutzung weltweit als das größte Umweltrisiko für die Gesundheit (WHO 2016). Besonders betroffen sind Menschen, die an Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen leiden. Jährlich gibt es schätzungsweise etwa 7 Mio. Todesfälle aufgrund verunreinigter Luft, von denen 4,3 Mio. der Verunreinigung der Innenraum- und 3,7 Mio. der Belastung der Außenluft zugerechnet werden. Bei der Luftverunreinigung im Innenraumbereich handelt es sich u.a. um eine Vielzahl von Haushaltschemikalien zur Innenraumhygiene sowie Ausgasung aus den verwendeten Bauhilfsstoffen wie z.B. Isoliermassen, Klebern und Kunststoffen sowie Weichmachern. Bei der Außenluft spielen die Luftschadstoffe Feinstaub und Stickstoffdioxid sowie das bodennahe Ozon eine besondere Rolle. Besonders das bodennahe Ozon kann bei ansteigenden Temperaturen deutlich höhere Konzentrationen erreichen. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Erweiterung grüner Infrastrukturen, die zur Verbesserung des Bioklimas in der Stadt empfohlen wird, zu negativen Nebeneffekten führen kann. Einige Pflanzen, v.a. Bäume, emittieren bei Extrembedingungen organische Stoffe (*Biogenic Volatile Organic Compounds*), die die Ozon-Bildung begünstigen können.

Neben den natürlichen Schwebstoffen aus Bodenerosion, Vulkanausbrüchen etc. gibt es viele Partikel aus anthropogenen Quellen (Verbrennungsmotoren, Reifen-, Straßen- und Bremsabrieb, Kraftwerke, Heizungen, Öfen, Landwirtschaft, etc.).

Die o.g. Luftschadstoffe treten üblicherweise als Gemisch auf. Die früher häufig auftretenden hohen Schwefeldioxidwerte aus Emissionen der Industrie und Heizungen haben in Europa durch die Einführung von Filteranlagen stark abgenommen.



Abb. 5: *Dauersmog in Indiens Hauptstadt Neu-Delhi. Am 4.11.2019 war die Luftverschmutzung so extrem, dass die Regierung den Geundheitsnotstand ausrief. Fahrverbote wurden für Lastwagen und PKWs verhängt; Privatwagen dürften nur an jeden 2.Tag genutzt werden. In Schulen fand kein Unterricht statt. Baustellen wurden mindestens für zwei Tage gesperrt. Eine Dunstglocke ist dort im Winter gewöhnlich. Ursachen: v.a. die Fahrzeug- und Industrieabgase. Ende Oktober ist Erntezeit und die Landwirtschaftsabfälle werden abgebrannt. Auch zu dieser Zeit ist das hinduistischen Lichterfest Diwali, das mit viel die Luft verschmutzendem Feuerwerk gefeiert wird.*

Landflucht und Zunahme der Megacities

Obwohl Stadtflächen weltweit derzeit nur 3% der Erdoberfläche beanspruchen, ist die Bedeutung des Stadtklimas ansteigend, und das nicht nur wegen des Klimawandels, sondern auch, weil die Städte durch die Landflucht immer schneller wachsen. Schon 2007 lebten nahezu 50% der Menschen in Städten. 2018 waren es 55%. Das ist ein erheblicher Zuwachs, wenn man bedenkt, dass der Anteil der Stadtbevölkerung in den 1950er Jahren noch bei nur 30% lag. Der Trend wird sich sehr wahrscheinlich noch fortsetzen. Nach Schätzung der Vereinten Nationen werden im Jahr 2050 vermutlich 70 Prozent aller Menschen in Städten leben. In absoluten Zahlen bedeutet das eine Verdopplung der Stadtbevölkerung auf 6 Mrd. Menschen. In Europa ist der Anteil der städtischen Bevölkerung noch höher. Nach UN Habitat Untersuchungen waren in der EU 2011 über 75% Städter, und dieser Anteil wird bis 2050 voraussichtlich auf 82% ansteigen (s. Kap. 5.6 - in diesem Band).

Im Jahr 1870 gab es nur 3 Millionenstädte (London, Paris und New York City). 1910 nahm diese Zahl durch die Städte: Chicago, Tokio, Wien, Berlin, Sankt Petersburg, Moskau, Philadelphia, Buenos Aires und Bombay auf 12 zu. 1950 gab es bereits 20 Millionenstädte, im Jahr 2000 schon 371 und 2018 sogar 548; schon 2030 könnten es 706 sein (Vereinte Nationen). 2018 lag in 33 Städten die Einwohnerzahl über Zehn-Millionen (Megastadt), und nach den Vereinten Nationen wird es bis 2030 bis zu 43 derartig große Städte geben.

Die Veränderungen städtischer Ökosysteme

Die Städte haben in den vergangenen Jahrzehnten weltweit drastisch an Zahl und Größe zugenommen. Mittelalterliche Städte waren eng und ummauert. Heutige Städte fressen sich in die Landschaft und nehmen immer größere Flächen in Anspruch. Die unterschiedlichen Funktionen äußern sich in einem heute sehr aufwendigen, umfangreichen Verkehrsnetz. Die Städte unterscheiden sich aber stark in ihrer Bebauungs- und Besiedlungsdichte, im Grad der Überbauung und der Verdichtung der Böden (*Abb. 6*).

Es existieren in den Städten aber dennoch die unterschiedlichsten Ökosysteme, und das Bestreben, Gebäude zusätzlich zu begrünen, wächst. Eine Begrünung reduziert Temperaturextreme und erhöht den Rückhalt des Regenwassers (*Abb. 14 und 15*). Städte selbst sind eigene Ökosysteme, auch wenn der Stoffkreislauf offen und die Energieflüsse nicht

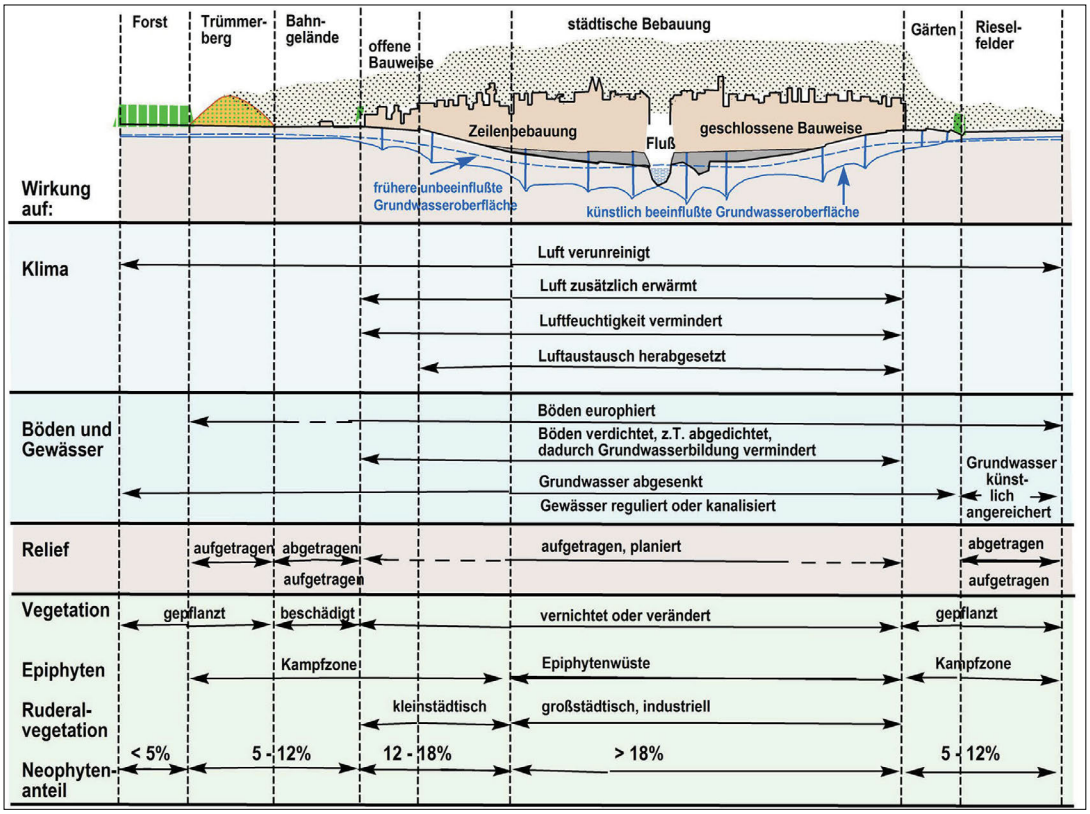


Abb. 6: *Abiotische und biotische Komponenten in einem Querschnitt durch die Stadt (https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/stadtoekologie/15474 - verändert nach S.-W. Breckle).*

ausgeglichen sind. Als künstliche, vom Menschen in Gang gehaltene Ökosysteme, weisen sie damit Besonderheiten auf, vor allem sind sie nicht autark. In den Städten wird mehr Energie und werden mehr Stoffe umgesetzt, als in der Stadt selbst zur Verfügung stehen. So werden Brennstoffe, Elektroenergie oder Wasser für Städte aus dem Umland bezogen, ebenso wie Nahrungsmittel, denn es werden weit mehr Nahrungsmittel konsumiert, als in der Stadt produziert werden können.

Andererseits produziert die Stadtbevölkerung und die städtische Infrastruktur mehr Industrieerzeugnisse, als in der Stadt selbst benötigt werden, sie versorgen somit das ganze Umland mit. Durch Überbauung und Versiegelung großer Flächen sowie durch die Produktion großer Mengen von Stoffen, die auf natürliche Weise nicht oder nur langsam abgebaut werden können, entstehen große Müllmengen; diese Abfallberge werden wiederum ins Umland »entsorgt«.

Die städtischen Grünflächen sind eigene Ökosysteme, sie unterliegen dem wärmeren Stadtklima, Flora und Fauna bestehen anteilmäßig sehr viel mehr aus Neophyten und Neozoen, denen das wärmere Stadtklima behagt. Einerseits fördern erhöhte Temperatur, CO_2-Konzentration und Stickstoffeinträge im Allgemeinen das Pflanzenwachstum, andererseits sind städtische Böden aufgrund der Versiegelung eher trocken. Wasser ist für die Vegetation nur kurzzeitig verfügbar. Auch das geringere Vorkommen von Bestäubern und Fressfeinden hat einen Effekt. Naturgemäß gibt es weniger Insekten als in grünen suburbanen Gebieten.

Die Stadt ist heutzutage in einem ständigen Umbau zur Anpassung an neue Verkehrsverhältnisse und Produktionsverfahren. Vielerorts wird die Fläche knapp und man muss in die dritte Dimension gehen: Es entstehen Hochhäuser und der Verkehr geht in den Untergrund (U-Bahn-Netz, Straßentunnels). All dies hat Auswirkungen auf das besondere Stadtklima. Die Durchlüftungsdynamik ist dabei oft sehr schwer erfassbar, ist aber ein wichtiger Aspekt, um die zu erwartenden sommerlichen Hitzewellen abzumildern. Aus dem Schema (*Abb. 6*) wird deutlich, dass die Stadt einen erheblichen Einfluss auf ihr weiteres Umland hat. Die Wechselwirkungen zwischen Klima, Boden, Relief, Vegetation und Fauna sind vielfältig.

Bei den heutigen Multi-Millionenstädten ist in manchen Ländern ein großer Ring an Slum-Siedlungen um die Stadt entstanden. Dieser Umstand macht das Stadt/Umland-Verhältnis noch schwieriger. Die weitere Ausdehnung mancher Millionenstädte führt zu einem immer stärkeren Abweichen des Stadtklimas vom Umland mit höheren Temperaturen, mit mehr Schwüle und auch oft mit deutlich höheren Niederschlägen, die aber nicht ausreichend schnell abfließen können. Die Auswirkungen gelegentlicher Wirbelstürme, selbst in hochentwickelten Ländern, wie Japan (Tokyo, Okt. 2019) und China, sind dann verheerend bis katastrophal.

Veränderung der Flora und Fauna in den Städten

Höhere Temperaturen und der aufgrund der starken Bodenversiegelung herrschende Wassermangel sind die dominierenden Faktoren für die registrierten Veränderungen der Flora und Fauna in Städten. Wärmeliebende Pflanzen und Tiere gedeihen besser in Städten als im Umland, auch weil die Wärme die Vegetationsperiode der Pflanzen verlängert. Für Wien konnte belegt werden, dass die Vegetationsperiode um bis zu 10-20 Tage länger dauert als im Umland.

Diese Artenverschiebung erfolgt nicht nur innerhalb des einheimischen Artenspektrums. Besonders fremde Arten aus wärmeren Regionen profitieren vom städtischen Klima. Zahlreiche Arten wie der nordamerikanische Parkbaum Robinie, der Riesenbärenklau aus dem Kaukasus oder der Götterbaum aus Asien und das beifußblättrige Traubenkraut, *Ambrosia,* breiten sich aus. Diese Arten verdrängen nicht nur die einheimischen Arten, sondern sie sind auch teilweise giftig und bedrohen die Gesundheit der Menschen.

Verkehr in der Stadt

Der Verkehr ist ein wachsendes Problem für den Klimaschutz, weil er nach wie vor sehr stark auf fossilen Energieträgern beruht. Die Kohlendioxidemission aus dem Sektor Verkehr ist seit 1990 weltweit angestiegen. Im Personen- und im Güterverkehr steigen sowohl Fahrleistung als auch Verkehrsaufwand weiterhin an. Vor allem der Luftverkehr verzeichnet große Wachstumsraten. Die PKWs fahren heute viel sauberer als früher. Die Anzahl der Fahrzeuge ist aber deutlich angestiegen.

In der Stadt nimmt insbesondere der Straßenverkehr viel Platz in Anspruch, daher wird der Ruf nach mehr Flächengerechtigkeit lauter, und der Druck nimmt zu, eine umfassende Verkehrswende einzuleiten. Dazu gehört ein Wechsel der Antriebstechnik mit dem Ziel der Dekarbonisierung, aber auch eine Änderung des Nutzungsverhaltens. Zugleich sind aber auch die Beharrungskräfte groß. Die Verkehrsinfrastruktur und die Siedlungs- und Lebensweisen eines großen Teils der Gesellschaft wurden seit Jahrzehnten auf das private Automobil hin ausgerichtet. Es gibt also eine mehrfach hohe Pfadabhängigkeit.

Eine Verkehrswende geht weit über eine Antriebswende hinaus. Sie ist mit einem grundlegenden stadt- und siedlungsräumlichen Umbau verbunden. Dafür braucht sie veränderte rechtliche und steuerliche Rahmenbedingungen und einen umfassenden Kulturwandel.



Abb. 7-9: *Bilder vom Fahrradparadies. Nirgends auf der Welt wird mehr Rad gefahren als in den Niederlanden (Links: Amsterdam; Foto J. Lozán. Mitte: Foto - Creative commons - public domain. Rechts: Foto: »Bicycle Rush Hour Copenhagen - Winter« by Mikael Colville-Andersen is licensed under CC BY-NC 2.0.*

Die schlechte Luftqualität und der Stadtlärm werden in Deutschland ganz wesentlich vom Straßenverkehr verursacht. Er ist zudem der Hauptverursacher der Stickstoffdioxid-Belastung und eine wichtige Feinstaubquelle. Nach wie vor wird der NO_2-Grenzwert (Jahresmittelwert von 40 µg/m³) an zahlreichen verkehrsnahen Messstationen überschritten. Im Jahr 2018 kam es in Deutschland immer noch an knapp 40% der verkehrsnahen Stationen zu Überschreitungen. Es sind also viele Menschen, besonders entlang stark befahrener Straßen, von hohen NO_2-Konzentrationen betroffen.

In zahlreichen deutschen Städten werden die vielen Vorteile des Fahrrads für eine lebenswerte Stadt noch nicht ausreichend gewürdigt. Die städtische Verkehrspolitik ist oft noch zu sehr am Auto ausgerichtet und für den Radverkehr werden zu wenig Flächen und finanzielle Mittel zur Verfügung eingestellt. Deutschland kann hier von den Niederlanden viel lernen. Das Fahrrad ist dort ein nationales Kulturgut geworden (*Abb. 7-9*).

Wasserversorgung in großen Städten

Hohe Temperaturen, Dürren und Hochwasser gefährden in vielen großen Städten auch die Wasserversorgung. Städte können in der Regel ihren Wasserbedarf nicht allein auf ihrem eigenen Gebiet decken, sondern sie sind auf die Ressourcen des Umlands angewiesen. Dabei werden oft Oberflächenwasserreserven aus großen Entfernungen genutzt und in die Metropolen geleitet. Das größte Wassertransferprojekt der Welt ist z.Zt. in China im Bau, wo von dem Drei-Schluchten-Staudamm bis 2050 jährlich 45 Mrd. m³ Wasser nach Norden geleitet werden sollen, um dort über eine halbe Mrd. Menschen, u.a. auch die Einwohner der Megastadt Beijing, zu versorgen (WBGU 2016). In Peru wird zur Versorgung der in der pazifischen Küstenwüste gelegenen Hauptstadt Lima das Amazonas-Flusssystem auf der Ostseite der Anden-Wasserscheide angezapft (s. Kap. 5.5 - in diesem Band). Wo ausreichende oberirdische Wasserressourcen fehlen, werden Grundwasserreserven genutzt und häufig übernutzt. Die Folge sind absinkende Grundwasserspiegel, das Absinken der Landoberfläche und in Küstenstädten das Eindringen von Salzwasser in Aquifere, was in besonderem Maße die Bewohner von Slumgebieten in Entwicklungsländern belastet, die oft von der öffentlichen Wasserversorgung ausgeschlossen sind und denen in vielen Fällen nur durch Abwasser belastetes Trinkwasser zur Verfügung steht (*Abb. 10*). Der Klimawandel verschärft vielerorts diese Probleme. Hohe Temperaturen und Dürren lassen durch zunehmende Verdunstung die Wasserressourcen schrumpfen (*Abb. 11*), Überschwemmungen kontaminieren vielfach das Brauchwasser, und der Meeresspiegelanstieg führt besonders in Deltagebieten zum Eindringen von Salzwasser (Kap. 3.3 - in diesem Band).



Abb. 10: *Verschmutzte Flüsse führen oft zur Belastung des Grundwassers (Katmandu, Nepal; Wikimedia Commons (2012): Kathmandu, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kathmandu_river_21.JPG, Lizenz: CC 0)*



Abb. 11: *Trinkwasserstausee Anaheim Lake in Kalifornien während der Dürre 2015 (California Department of Water Resources; Foto: 25.2.2015, Florence Low; Lizenz: public domain)*

Hochwasser in Städten

Neben Hitzewellen und häufig damit zusammenhängenden Dürren sind große Städte auch durch Hochwasser zunehmend gefährdet. Man identifiziert verschiedene Ursachen:

Erderwärmung: Die häufiger gewordenen Starkregen machen sich in vielen großen Städten besonders bemerkbar. Fallstudien zeigen, dass sowohl die mittleren als auch die extremen Niederschläge über städtischen Gebieten zugenommen haben, vor allem nachmittags und abends, wenn die Konvektion im Tagesverlauf am stärksten ist. Das wurde sowohl für US-Städte als auch für Hamburg, Beijing, Shanghai und Jakarta festgestellt. Der Grund dürfte in der stärkeren Erwärmung und dem dadurch bedingten höheren Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre liegen. Zunehmende Aerosolkonzentrationen können dem aber auch entgegenwirken und durch die Bildung von vielen kleinen Tröpfchen Starkregen reduzieren (IPCC 2019). Hinzu kommt, dass die Urbanisierung selbst dazu beiträgt, dass es bei starken Niederschlägen oft zu intensiven und verbreiteten Überschwemmungen kommt. Verbreitete Bodenversiegelung und oft unzulängliche Kanalisationssysteme lassen das Niederschlagswasser nicht schnell genug abfließen.

Anstieg des Meeresspiegels: Megastädte befinden sich häufig in niedrig gelegenen Küstenzonen, wo sie durch Meeresspiegelanstieg und heftigere tropische Wirbelstürme zunehmend Überschwemmungen vom Meer her ausgesetzt sind. Das betrifft insbesondere asiatische Megastädte in Deltagebieten wie Kalkutta, Ho-Chi-Minh-Stadt, Jakarta, Manila u.a..

Absenkung des Bodens: Grundwasserentnahme und Gebäudebelastung sowie geologische Prozesse bewirken eine Absenkung des Bodens. Dadurch werden Hochwasserereignisse begünstigt. Besonders gefährdet sind rasant wachsende Metropolen in den Schwellen- und Entwicklungsländern, die wirtschaftlich nicht in der Lage sind, Schutzmaßnahmen zu treffen. Dadurch fehlt eine adequate Anpassung der lokalen Infrastruktur an die sich verändernden Bedingungen.



Abb. 12: *Überfluteter Stadtteil in Lagos (Nkwunonwo et al. 2016, Lizenz: CC BY).*

Es gibt Städte wie New York City (NYC), die mehrfach mit den Folgen des Klimawandels konfrontiert sind. NYC liegt in einer Region mit einem überdurchschnittlichen Meeresspiegelanstieg. Gleichzeitig erfährt das Gebiet eine geologische Absenkung des Untergrunds und ist ausserdem aufgrund seiner Küstenformen durch Sturmfluten besonders bedroht.

Starkniederschläge in schnell wachsenden Städten

Die nigerianische Megastadt Lagos ist mit einer Wachstumsrate von 3,2% jährlich eine der am schnellsten wachsenden Städte der Welt und hatte 2018 13,5 Mio. Einwohner (United Nations 2019). Hochwasserereignisse haben in den letzten Jahrzehnten spürbar zugenommen. Als Gründe werden der Klimawandel und das ungesteuerte urbane Wachstum diskutiert. Zwei Drittel der Bevölkerung leben in Slums, wo weniger als 1% der Haushalte an Abflusssysteme angeschlossen sind. Überschwemmungen in den Slums sind in Lagos über große Flächen knietief und das Wasser steht manchmal sogar meterhoch in den Unterkünften (*Abb. 12*). Die starke Ausbreitung von Elendsvierteln hat natürliche Abfluss- und Versickerungsflächen überdeckt, so dass sich das Wasser in den niedrig gelegenen Gebieten mit nur geringem Gefälle anstaut. Dabei kommt es zur Vermischung mit unbehandelten Abfallchemikalien und anderen gesundheitsgefährdenden Stoffen. Das belastete Wasser landet vielfach am Ende in der Lagune von Lagos, die zugleich dem Fischfang dient (Nkwunonwo et al. 2016). Eine ähnliche Situation existiert in Mumbai, der zweitgrößten Stadt Indiens (WBGU 2016). Auch hier wurde eine Zunahme von Starkregen beobachtet. Überschwemmungen von ca. einem Meter Höhe in der Stadt erlebt Mumbai fast zu jeder Monsunzeit im Juli und August, in der bis zu 1.500 mm Niederschlag fallen. Im Juli 2005 fielen jedoch an einem einzigen Tag fast 1.000 mm Regen. Zahlreiche Stadtteile wurden bis zu 3 m unter Wasser gesetzt, unzählige Hütten in den Slumgebieten wurden zerstört. Das veraltete Entwässerungssystem, bestehend aus Flüssen, größeren und kleineren offenen Kanälen, konnte die mit Abwasser vermischten Wassermassen nicht bewältigen. Kontaminiertes Trinkwasser führte zu Magen-Darm-Erkrankungen wie Cholera und Ruhr. Die Regierung der Stadt reagierte auf diese Katstrophe erst zwei Jahren später mit dem ersten Greater Mumbai Disaster Management Action Plan.

Starkregen in Deutschland: Umgang mit dem Wasser

In Deutschland wurden die kommunalen Entwässerungssysteme, zumeist unterirdisch, in früheren Jahren gebaut, als der Klimawandel noch nicht in

Sicht war. Sie sind daher nicht für (z.T. mehrtätige) Starkregen dimensioniert. Hinzu kommt das Wachstum vieler Städte und die zunehmende Verdichtung und Versiegelung. So kommt eine Studie der Schadenverhütung GmbH aus dem Jahr 2018 zu dem Schluss, dass die 50 einwohnerstärksten Städte Deutschlands einen mittleren Versiegelungsgrad von über 30% besitzen. Die versiegelte Fläche nimmt mit der Bebauung und Bevölkerung weiter zu. Die Folge ist ein erhöhter Oberflächenabfluss, der von den Kanälen nicht mehr aufgenommen werden kann und zum Überstau aus der Kanalisation und Überflutungen an der Oberfläche führt.

Eine Erweiterung der Kanalisation ist oft wegen ökonomischer und technologischer Gründe nicht geplant. Massive bauliche Tätigkeiten wären erforderlich. Es wird auf ein Umdenken gesetzt. Statt unterirdischer Veränderungen sollen Möglichkeiten an der Oberfläche mit einbezogen werden: a) Schaffung von mehr Rückhaltemöglichkeiten, b) Erhöhung der Verdunstung und Versickerung über grüne Flächen (s. Kap. 6.7 in diesem Band).

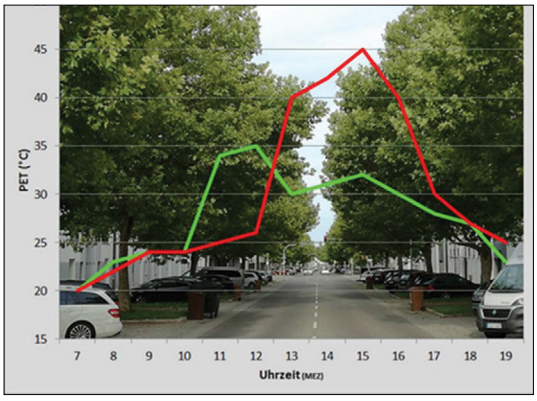


Abb. 13: *Temperaturverlauf an einen Sommertag. Grün: in einem beschatteten und (Rot:) unbeschatteten Straßenabschnitt in München (Foto: J. Baumüller).*

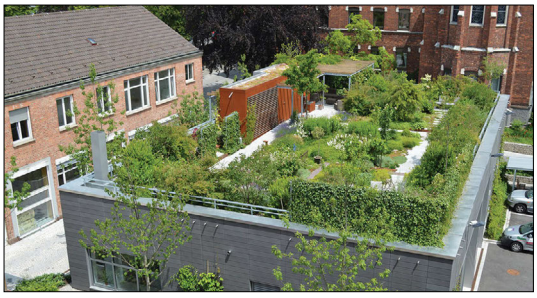


Abb.14: *Dachbegrünung (Foto: Baumüller).*



Abb. 15: *Fassadenbegrünung (Foto: B. Gabriel).*

Maßnahmen zur Reduzierung der thermischen und lufthygienischen Belastung

Aufgrund der Erderwärmung, der Hitzewellen, der stärker voranschreitenden Urbanisierung und der baulichen Verdichtung sind immer dringender Maßnahmen zum Schutz vor allem der Natur und der menschlichen Gesundheit erforderlich. Es wird vielfach empfohlen, die grüne Infrastruktur in den Städten zu verbessern. Dies kann sowohl großräumig als auch kleinräumig sein. Großräumige Maßnahmen sind z.B. Aufforstungen von stadtnahen Wäldern und die Anlage von Parks. Zu den kleinräumigen Maßnahmen gehören z.B. Dach- und Fassadenbegrünung. Man spricht auch von einer Verbesserung grün-blauer Infrastrukturen, wenn natürliche und künstliche Gewässer dazu gezählt werden. Auch Gewässerzonen verringern die Lufttemperatur und verbessern das Bioklima der Stadt. Insgesamt stellen grün-blaue Infrastrukturen einen gewissen Ausgleich zu der Bebauung und dem zunehmenden Verkehr dar (s. Kap. 6.1, Kap.6.2 u. Kap. 6.3 - in diesem Band).

Die klimatische Wirkung grüner Infrastruktur wird schon lange untersucht und ist auch gut dokumentiert. Es zeigt sich, dass sich die klimatische Wirkung des Grüns bezüglich der Temperatur meist auf den Standort selbst beschränkt, eine weitreichende Wirkung ist nicht feststellbar. Es ist wichtig dabei, die gefühlte Temperatur und nicht die tatsächliche Lufttemperatur in den Vordergrund zu stellen. Im nahen Umfeld des Grüns sind Verbesserungen bei der gefühlten Temperatur bis zu 20 Grad möglich, während sich der Einfluss auf die Lufttemperatur nur auf wenige Grad beschränkt (*Abb. 13*). Mit den zunehmenden Hitzewellen ist auch die Gefahr von längerer Trockenheit gegeben, wie die Jahre 2018 und 2019 in Deutschland zeigten. Der Ausbau der grünen Infrastruktur muss deshalb einhergehen mit Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung.

Abb. 14 zeigt eine Dachbegrünung mit Gras und Büschen und *Abb. 15* eine Fassadenbegrünung mit immergrünen Kletterpflanzen. Man schätzt, dass 1 m² Grasdach 0,5-1 kg Staub im Jahr aufnimmt. Von einer messbaren positiven Auswirkung auf das Stadtklima gehen Fachleute aus, wenn mindestens 10% der Fläche eines Gebäudes begrünt werden.

Klimaanpassungsmaßnahmen

Insbesondere in Städten besteht Handlungsbedarf, um mit den zunehmenden Wetterextremen wie Hitze und Trockenheit sowie Starkregen und Hochwasser umzugehen. Bei der Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen auf lokaler Ebene nehmen die Städte und Kommunen eine Schlüsselrolle ein. Dabei unterscheidet man zwischen gebäudebezogenen und stadt- und bauplanerischen Maßnahmen. Von großer Bedeutung ist, dass Städte und Kommunen in ihrer Planung fachgerechte Anpassungsmaßnahmen integrieren. Die politischen Rahmenbedingungen sind vielseitig gegeben. Das deutsche Baugesetzbuch (2014, 2018) besagt, dass bei allen Planungen neben dem Klimaschutz auch die Klimaanpassung zu berücksichtigen ist. Nach dem Umweltbundesamt bieten die Regelungen im Baugesetzbuch einen ausreichenden Rahmen für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen. Dieses setzt voraus, dass in der zuständigen Verwaltung ein ausreichendes Problembewusstsein und das nötige Wissen vorhanden sind. Einige Städte haben inzwischen damit begonnen, Klimawandelanpassungsstrategien zu erarbeiten und umzusetzen.

Literatur

IPCC (2019): Land, Cross-Chapter Box 4.

BAUMBACH G. (1991): Luftreinhaltung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. *https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d403_01.htm*.

KRUMMENAUER L. & J. KROPP (2018): Grenze der Bewohnbarkeit in heißen Regionen am Beispiel des Nahen Ostens. *https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2018/11/Krummenauer_Kropp.pdf*

KUTTLER W. (2018): Hitzewellen in großen Städten: Folgen für die Gesundheit und Gegenmaßnahmen. *https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2018/11/Kuttler.pdf.*

MATTHEWS T. K. R., R. L. WILBY & C. MURPHY (2017): Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(15), 3861–3866, doi:10.1073/pnas.1617526114.

MVI (Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg) (Hrsg.) (2012): städtebauliche Klimafibel. Stuttgart, 7-248 S. *http://www.staedtebauliche-klimafibel.de.*

NKWUNONWO U. C., M. WHITWORTH & B. BAILY (2016): Review article: A review and critical analysis of the efforts towards urban flood risk management in the Lagos region of Nigeria, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 349-369, https://doi.org/10.5194/nhess-16-349-2016

STORCH H. VON, I. MEINKE & M. CLAUßEN (2018): Hamburger Klimabericht. Springer Natur. 302 S. *https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-662-55379-4*.

OKE T. R. (1978): Boundary layer climates. Methuen Ltd. 1978. 372. pp.

PAPALEXIOU S. M., A. AGHAKOUCHAK, K. E. TRENBERTH & E. FOUFOULA-GEORGIOU (2018): Global, regional, and megacity trends in the highest temperature of the year: Diagnostics and evidence for accelerating trends. Earth's Future, 6, 71-79. *https://doi.org/10.1002/2017ef000709.*

PÖSCHL U. (2005): Atmosphärische Aerosole: Zusammensetzung, Transformation, Klima- und Gesundheitseffekte. Angew. Chemie, 117, 7690-7712.

UNITED NATIONS (2019): World Urbanization Prospects 2018. Highlights, New York.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. *https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/der-umzug-der-menschheit-die-transformative-kraft-der-staedte.*

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. *https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/der-umzug-der-menschheit-die-transformative-kraftder-staedte.*

WHO (World Health Organisation) (2016): Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of disease.

ZISKA, L. H., D. E. GEBHARD, D. A. FRENZ et al. (2003): Cities as Harbingers of Climate Change: Common Ragweed, Urbanization, and Public Health. J. Allergy Clinical Imm., 111, 2, 290-295.

Kontakt:

Dr. José L. Lozán
Universität Hamburg
lozan@uni-hamburg.de

Prof. Dr. Siegmar-W. Breckle
Ökologie Bielefeld
sbreckle@gmx.de

Prof. Dr. Hartmut Graßl
Max-Planck-Institut für Meteorologie
hartmut.grassl@mpimet.mpg.de

Dr. Dieter Kasang
Deutsches Klimarechenzentrum
kasang@dkrz.de

Prof. Dr. Andreas Matzarakis
Deutscher Wetterdienst - Freiburg
andreas.matzarakis@dwd.de

Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang & A. Matzarakis (2019): Die Städte im Klimawandel. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 11-20. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.02.

1. CHARAKTERISIERUNG DES STADTKLIMAS

Das Stadtklima unterscheidet sich vom Klima des Umlandes mal mehr, mal weniger stark; es ist eine vom Menschen verursachte Veränderung, die allerdings je nach Region sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. In diesem ersten Teil wird das Stadtklima gekennzeichnet (Kap. 1.1 und 1.2). Die besonders wichtigen Klima-Parameter und ihre Veränderungen gegenüber dem Umland werden herausgestellt (Kap. 1.3). Der Versiegelungsgrad und die Vergrößerung der Oberflächen durch Gebäude im urbanen Raum sind die bestimmenden Faktoren. Einerseits führt dies zu einem veränderten Wasserkreislauf, der technische und wasserbauliche Maßnahmen erfordert, andererseits zeigen die Luftschichten in und über der Stadt im Mittel reduzierte Windgeschwindigkeit (Kap. 1.4 und 1.5) aber auch Verwirbelungen. In beiden Fällen kommt es auf geeignete planerische und bauliche Maßnahmen an, um das Stadtklima erträglich zu halten. Dies erfordert ein integriertes Stadtentwicklungskonzept (Kap. 1.6), bei dem z.B. die Belange der Wasserwirtschaft, der Verkehrsentwicklung, der Luftreinhaltung, des Bodenschutzes und des Arten- bzw. Biotopschutzes mit einer nachhaltigen Klimaanpassung in Einklang zu bringen sind.

1.1 Stadtklima: Einführung, Charakteristika, Nachweismöglichkeiten

Wilhelm Kuttler

Der Beitrag stellt die Charakteristika des Stadtklimas heraus und beschäftigt sich insbesondere mit den Unterschieden bei Strahlung, Temperatur und Wasserhaushalt, die sich zwischen Stadt und Umland ergeben. Am Beispiel der Energiebilanz wird der besondere Einfluss urbaner Flächen auf die bodennahe Grenzschicht erläutert. Anhand der städtischen Wärmeinsel (UHI) wird gezeigt, welche Temperaturunterschiede in thermischer Hinsicht zwischen Stadt und Umland auftreten. Um Klimaeffekte der Stadt nachweisen zu können, werden verschiedene Möglichkeiten beschrieben und diskutiert. In einem Ausblick wird auf die sich durch den Klimawandel ergebenden Probleme eingegangen und es werden Gegenmaßnahmen auf lokaler Ebene benannt.

Urban climate: introduction, characteristics, estimation of urban effects: *The paper highlights the characteristics of the urban climate and deals in particular with the actinic, thermal and hydrological differences that arise between a city and its surroundings. Using the energy balance as an example, the special influence of urban areas on the atmospheric boundary layer is explained. Based on the urban heat island (UHI) phenomenon the qualitative differences between a city and its rural environment in thermal terms are shown. In order to be able to demonstrate urban climatic characteristics, various possibilities are described and discussed for separating the urban climatic effect from that of the surrounding area. In an outlook, the problems arising from global climate change are addressed and countermeasures at the local level are named.*

Definition

Die Stadtklimatologie ist Teil der Umweltmeteorologie und untersucht die stofflichen und energetischen Wechselwirkungen zwischen der bodennahen Atmosphäre und einer Stadt. Es handelt sich hierbei um denjenigen Ausschnitt aus der atmosphärischen Grenzschicht, der wenige Kilometer umfasst und somit dem mikro- und mesoskaligen Bereich zuzuordnen ist.

Städte weisen – im Vergleich zu ihrem Umland – in Abhängigkeit ihres Grund- und Aufrisses, der Zuordnung und Mischung natürlicher und bebauter Flächen, ihres Versiegelungsgrades, der Emission an Abwärme und Luftbeimengungen sowie des vorherrschenden Witterungstyps charakteristische thermische, hydrologische und strömungsdynamische Unterschiede auf. Auch die geographische Lage und die landestypische Wirtschaftsform bleiben nicht ohne Einfluss auf das Klima in einer Stadt.

Das Stadtklima ist generell eine anthropogene, jedoch unbeabsichtigte Klimamodifikation, deren Bedeutung auf Grund der genannten Einflussgrößen differieren kann.

Da die Klimaeffekte einer Stadt weltweit sehr unterschiedlich ausfallen können, sollte deshalb eher von »Stadtklimaten« als von einem vereinheitlichenden »Stadtklima«-Typus gesprochen werden (Oke et al. 2017; Wienert & Kuttler 2005).

Charakteristika des Stadtklimas

Die wesentlichen Strukturmerkmale und Klimaunterschiede zwischen stärker dreidimensional gegliederten Stadt- und nicht versiegelten, natürlich belassenen, ebenen Umlandarealen werden für einen mitteleuropäischen Großstadttypus in *Tab. 1.1-1* zusammengefasst.

So ist in Stadtgebieten die mittlere Windgeschwindigkeit wegen der zahlreichen Strömungshindernisse

reduziert, was zu einer Verringerung des Luftaustausches führt. Wärmeabfuhr – insbesondere bei warmer Witterung – und der Abtransport von Luftverunreinigungen sind dann eingeschränkt. Allerdings kann die Böigkeit des Windes sowohl bei Richtung und Geschwindigkeit vor allem an Gebäudekanten stark erhöht sein (zur Struktur der Stadtatmosphäre s. Kap. 1.3 Christen - in diesem Band). Die Luftfeuchte weist in Städten überwiegend niedrigere Werte auf als im Umland. Gelegentlich jedoch, insbesondere bei schwachem Wind, ist sie im Stadtgebiet im Vergleich zum Umland erhöht, weil im urbanen Bereich der Taupunkt seltener erreicht wird als im Umland. Man spricht dann von einem städtischen Feuchteüberschuss (engl. *Urban Moisture Excess*, *UME*; Kuttler et al. 2007). Die in früherer Zeit vielerorts zu beobachtende wesentlich höhere Anzahl an Nebeltagen pro Jahr in der Stadt hat wegen der Verbesserung der Luftqualität und oft auch der Zunahme der Überwärmung stark abgenommen (Vautard et al. 2009).

Die Vergrößerung der urbanen Oberflächen durch die Gebäude sowie die Verwendung von überwiegend künstlich hergestellten Baumaterialien haben darüber hinaus einen wesentlichen Einfluss auf die urbane Energiebilanz.

Letztere spielt eine dominierende Rolle als wichtiges Steuerungselement der bodennahen Grenzschichtprozesse. Aus diesem Grund sollen die entsprechenden Unterschiede, die sich zwischen einem Stadt- und Umlandstandort ergeben, kurz und exemplarisch erläutert werden.

Allgemein setzt sich die Energiebilanz (Q^*) einer Oberfläche aus der jeweiligen Strahlungs- und Wärmebilanz zusammen. Sie lautet in der hier verwendeten,

	Parameter	Veränderung im Vergleich zum Umland
1.	**Oberfläche**	„2 d"-Umland gegenüber „3 d"-Stadt; dadurch Vergrößerung der wahren urbanen Oberfläche; zudem starke horizontale und vertikale Versiegelung
2.	**Bausubstanz / Untergrund**	Hohe Materialdichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität (»Speicherfähigkeit«); durch Versiegelung veränderter Wasserhaushalt (Abflusserhöhung, Verdunstungseinschränkung = geringere Abkühlung durch reduzierten latenten Wärmestrom Q_E); durch Versiegelung Verlust an natürlichen Kaltluftbildungsflächen
3.	**Strahlungsbilanz**	Beeinträchtigung aller Strahlungsbilanzglieder in Abhängigkeit vom jeweiligen Reflexionsgrad- α und Emissionsgrad ε; Einfluss durch Straßenschluchtgeometrie (Haushöhen/Straßenbreitenverhältnis) auf Strahlungstransport und turbulenten Austausch; höhere Oberflächentemperaturen horizontaler und vertikaler Flächen führen zu stärkerer langwelliger Ausstrahlung
4.	**Wärmebilanz**	Fühlbarer Wärmestrom Q_H höher als latenter Wärmestrom Q_E, dadurch höhere Lufttemperatur; zusätzliche Emission an »anthropogener Wärme« Q_F durch menschlichen Metabolismus, Gewerbe, Klimaanlagen, Gebäudebeheizung, Industrie, Kfz
	Temperatur	Höhere Oberflächentemperatur tags und nachts sowie höhere Lufttemperatur (*UHI*) insbesondere nachts in der Stadt
6.	**Luftfeuchtigkeit**	Niedriger durch reduzierte Regenwasserversickerung sowie eingeschränkte Evapotranspiration und Interzeptionsverdunstung; Wetterlagen abhängig jedoch in Einzelfällen höher (*UME*)
7.	**Wind**	Abnahme der Windgeschwindigkeit, dadurch reduzierter thermischer und Spurenstoffaustausch; allerdings Zunahme der Böigkeit (Richtung und Geschwindigkeit) an oder in der Nähe von Gebäudekanten; Düseneffekte in Straßenschluchten
8.	**Luftverunreinigung**	Überwiegend höhere Konzentrationen (fest, flüssig, gasförmig) durch Emissionen von Kfz, Gewerbe, Industrie, Hausbrand. Filterfunktion gas- und partikelförmiger Luftinhaltsstoffe durch Vegetation vorhanden, allerdings gering; einige Pflanzen geben biogene Kohlenwasserstoffe (BVOC) ab, die Ozonkonzentration lokal erhöhen können
9.	**Anthropogener Stressfaktor**	Erhöht wegen stärkerer Wärme- und Lärmbelastung sowie schlechterer Luftqualität

Tab. 1.1-1: *Struktur- und Klimaunterschiede zwischen gegliederten Stadt- und ebenen, nicht versiegelten Umlandarealen (generalisierte Darstellung für mitteleuropäische Großstädte, in Anlehnung an Kuttler 2010, 2013; Wittig et al. 2014; verändert).*

allgemeinen Form (Erklärung und Werte der Terme siehe *Tab. 1.1-2* und *-3*):

$$K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow = Q^* = Q_H + Q_E + Q_S + Q_F \qquad (1)$$

Während der linke Teil von Gl. 1 die Strahlungsbilanz repräsentiert, umfasst der rechte Teil die Wärmebilanz.

Die Größenordnung der einzelnen Terme wird durch die für die jeweiligen Oberflächen und Baumaterialien charakteristischen Steuerungsgrößen Albedo α, Emissionsvermögen ε, Rauigkeitslänge z_0, Wärmeleitfähigkeit λ, Wärmeeindringkoeffizient b, spezifische Wärme c des Bodens sowie dessen Wärmekapazität (ζ) bestimmt.

Für ein Stadtgebiet ist die Energiebilanzgleichung durch die anthropogene Wärmeflussdichte Q_F (in Gl. 1 enthalten) zu ergänzen. Diese kann relativ hohe Werte bis zur Größe der langjährig gemittelten kurzwelligen Globalstrahlungsflussdichte in stark verdichteten Stadtarealen erreichen, und zwar dann, wenn viel Energie zum Heizen resp. zum Kühlen der Gebäude benötigt wird.

Für spezielle Untersuchungen sind zusätzlich die Bodenwärmeflussdichte (Q_S) und der Advektionsterm (Q_{Adv}) in die Gleichungen mitaufzunehmen (in Gl. 1 nicht enthalten).

Tab. 1.1-2 enthält Werte der Strahlungs- und Wärmebilanz für einen Stadt- und Umlandstandort in Mitteleuropa, wobei mittlere Verhältnisse an Sommertagen ($t_a \geq 25$ °C) zugrunde gelegt wurden.

Die Differenzen der Strahlungsbilanzglieder in Stadt und Umland beruhen hauptsächlich auf den unterschiedlichen Werten der atmosphärischen Trübung (Einfluss auf $K\downarrow$), Albedo α (Einfluss auf $K\uparrow$) und Oberflächentemperatur (t_S; Einfluss auf $L\uparrow$).

Tab. 1.1-3 belegt für die Wärmebilanz, dass die turbulente fühlbare Wärmeflussdichte die Atmosphäre über der Stadt deutlich stärker erwärmt ($Q_H/Q^* = 0{,}49$) als diejenige des nicht bebauten Umlands ($Q_H/Q^* = 0{,}18$). Im Umland hingegen dominiert die turbulente latente Wärmestromdichte die Bilanz ($Q_E/Q^* = 0{,}44$), während in der Stadt aufgrund von Versiegelung und Trockenheit ein geringerer Wert ($Q_E/Q^* = 0{,}27$) erreicht wird, so dass dort kühlende Verdunstungseffekte wesentlich kleiner sind.

Die thermischen und hydrologischen Eigenschaften versiegelter Flächen werden im Wesentlichen durch die verwendeten Baustoffe bestimmt. Für die Energie- und Wasserbilanzen der Oberflächen sind zudem deren Farbe und Wasseraufnahmefähigkeit von besonderer Bedeutung. Die in Städten überwiegenden Asphalt- und Betonflächen können witterungsabhängig extreme thermische Eigenschaften aufweisen. So liegen zum Beispiel die für die Speicherfähigkeit ausschlaggebenden Wärmekapazitätsdichten (ζ) der genannten Materialien etwa um den Faktor zwei über denjenigen natürlichen trockenen Bodens. Verfügen diese Flächen darüber hinaus über eine dunkle Farbe, so wird bei starker Sonneneinstrahlung besonders viel Energie aufgenommen und sowohl über den turbulenten fühlbaren Wärmestrom (Q_H) als auch über die langwellige Ausstrahlung ($L\uparrow$) an die Atmosphäre und den sich auf diesen Oberflächen möglicherweise aufhaltenden Menschen abgegeben. Während Q_H im Allgemeinen erhöht ist – wie oben gezeigt wurde –, kann Q_E wegen mangelnder Versickerung und Verdunstung auf Grund der Versiegelung sowie des schnell abfließenden Niederschlagswassers über die Kanalisation stark verringert sein. Das diese beiden Wärmeströme

Strahlungsbilanzterme	Stadt	Umland
Kurzwellige Einstrahlung $K\downarrow$	16,5	17,8
Kurzwellige Reflexion $K\uparrow$	-1,8	-2,8
Kurzwellige Strahlungsbilanz K^*	14,7	15,0
Langwellige Gegenstrahlung $L\downarrow$	31,4	32,1
Langwellige Ausstrahlung $L\uparrow$	-37,5	-35,8
Langwellige Strahlungsbilanz L^*	-6,1	-3,7
Strahlungsbilanz $Q^* = K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow$	8,6	11,3

Tab. 1.1-2: *Mittlere sommerliche Tagessummen der Strahlungsbilanzglieder eines Stadt- und Umlandstandortes im Raum Essen für Sommertage mit Höchstwerten der Lufttemperatur über 25 °C (in MJ/(m²·d)); Messzeitraum 06/12-05/13; (nach* Kuttler *et al. 2015, verändert).*

Wärmebilanzterme	Stadt	Umland
Fühlbare Wärmeflussdichte Q_H	4,2 (49 %)	2,0 (18 %)
Latente Wärmeflussdichte Q_E	2,3 (27 %)	5,0 (44 %)
Bodenwärmeflussdichte Q_S	2,1 (24 %)	4,3 (38 %)
Wärmebilanz $Q^* = Q_H + Q_E + Q_S$	8,6 (100 %)	11,3 (100 %)
Bowen-Verhältnis $Bo = Q_H/Q_E$	1,8	0,4

Tab. 1.1-3: *Mittlere Tagessummen der Wärmebilanzglieder an Sommertagen für eine Stadt- und Umlandstation im Raum Essen (in MJ/(m²·d)); Messzeitraum 06/12-05/13 (nach* Kuttler *et al. 2015; verändert).*

verbindende Bowen-Verhältnis ($Bo = Q_H/Q_E$) beläuft sich deshalb für derartige Flächen im Mittel auf $Bo > 1$ (siehe *Tab. 1.1-2*). Hierdurch wird ausgedrückt, dass die Erwärmung der Stadtatmosphäre primär durch den turbulenten fühlbaren Wärmestrom erfolgt, dem überdies auf Grund des eingeschränkten Q_E-Anteils wegen der verringerten Verdunstung noch zusätzliche Energie zugeführt wird.

Hydrologische Verhältnisse von Oberflächen

Wie sehr die Oberflächenbeschaffenheit die hydrologischen Verhältnisse städtischer Areale beeinflusst, zeigt nachfolgendes Beispiel. Für die Versickerung von Wasser in den versiegelten Untergrund sind Anzahl und Durchlässigkeit von Fugen und Rissen des abdichtenden Materials maßgeblich. So weist zum Beispiel eine Asphaltfläche in Bezug auf die Jahresniederschlagssumme (Bsp. Berlin) einen Abfluss von rund 70 % auf, während eine Rasengittersteinfläche nur etwa 5 % erreicht (Wessolek 2001). Vergleicht man beide Oberflächen hinsichtlich ihrer Evapotranspirationsfähigkeit, so zeigt sich, dass eine Asphaltfläche etwa 20 %, eine mit Rasengittersteinen bedeckte Fläche hingegen 45 % des Jahresniederschlags zu verdunsten vermag. Wegen der hohen Verdunstungswärme von Wasser ($q_{v,W\ 20\ °C}$ = 2,45 MJ/kg) haben beide Materialien einen außerordentlich unterschiedlichen Einfluss auf Q_E. So tragen verdunstungsaktive Rasengittersteinflächen – und erst recht reine Grünflächen – nach einem Niederschlagsereignis wesentlich weniger zur anschließenden Lufterwärmung bei als zum Beispiel Asphaltoberflächen.

Für Grünflächen ist dabei jedoch grundsätzlich zu beachten, dass deren maximale verdunstungsaktive Wirkung nur bei ausreichender Wasserversorgung stattfinden kann. Das in *Abb. 1.1-1* dargestellte Beispiel zeigt, dass das Bowenverhältnis für eine Rasenfläche in Abhängigkeit von der Länge der regenfreien Zeit (hier als Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage nach einem Niederschlagsereignis dargestellt) erst langsam, dann stärker zunimmt. Das gilt zwar verstärkt für einen versiegelten Stadtstandort, jedoch auch für eine naturbelassene Grünfläche, die ja aus den oben genannten Gründen eine Abkühlung bewirken soll. Hält die Trockenheit mehrere Tage an, verliert selbst eine Grünfläche ihre Kühlwirkung, was insbesondere während länger dauernder Hitzeepisoden, die positiv korreliert sind mit den Mortalitätsraten der Bevölkerung (Kuttler 2018), ein Problem darstellen dürfte. Bewässerungsmaßnahmen sind dann unumgänglich, falls eine Abkühlung über den turbulenten latenten Wärmestrom durch diese Flächen weiterhin gewährleistet sein soll.

In Bezug auf den Wasserhaushalt städtisch geprägter Flächen sollte nicht nur an die Verdunstung und den Abfluss gedacht werden, sondern auch die Grundwasserneubildungsrate unter den verschiedenen Oberflächen beachtet werden. So lässt sich *Tab. 1.1-4* für verschiedene Nutzungen in einer Stadt entnehmen, dass sich zum Beispiel begrünte Dächer positiv gegenüber nicht begrünten Dachabdeckungen auf die Verdunstung und den Oberflächenabfluss auswirken. Ein Vergleich zeigt, dass die Verdunstung eines Gründaches in Bezug auf den gefallenen Niederschlag mit 72 % wesentlich größer ist als die aus anderen Materialien bestehenden Flächen. Da der Oberflächenabfluss eines Gründachs lediglich mit 28 % zu Buche schlägt (beim Hartdach sind es 80 %) und zudem auch zeitverzögerter einsetzt, werden Abflussspitzen stark reduziert, was einer ausgeglicheneren Wasserspende in die Kanalisation zu Gute kommt. Da der Anteil an Starkregen in Zukunft zunehmen soll, bestünde in einer großflächigeren Begrünung von Dächern und dem Anlegen versickerungswirksamer Mulden und Rigolen (unterirdischer Pufferspeicher; Bei-

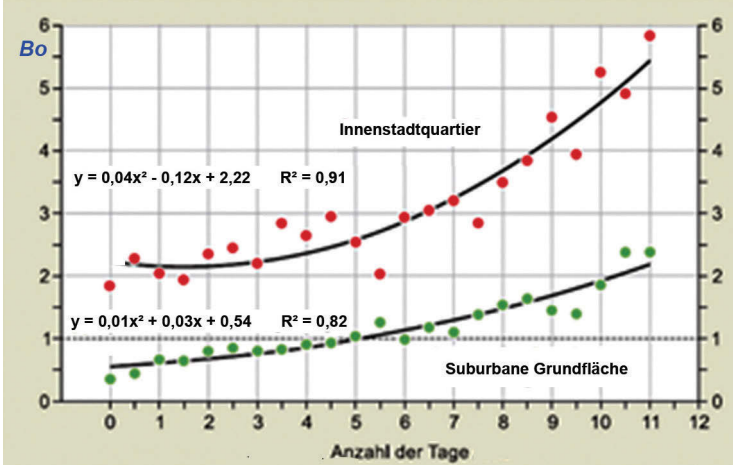


Abb.1.1-1: *Abhängigkeit des Bowen-Verhältnisses (Bo) von der Anzahl der Trockentage nach einem Niederschlagsereignis (P > 0,1 mm/d) (Quelle: Kuttler et al. 2015).*

	Verdunstung	Oberflächenabfluss (inklusive Abfluss in die Kanalisation)	Grundwasser-neubildung
Unbebautes Gebiet (Ausgangszustand)			
– Acker- und Grünlandnutzung	55	9	36
Bebautes Gebiet			
– Hartdach[1)]	20	80	0
– Gründach[1)]	72	28	0
– Straße	25	75	0
– Teildurchlässige Beläge[2)]	30	55	15
– Muldenversickerung[3)]	23	1	76
– Rigolenversickerung[3)]	10	1	89
– Freiflächen (Mischvegetation)	65	7	28

1) 70 % Dachfläche mit 45°-Neigung (= 100 %), 30 % mit 2 % Neigung; Gründach: Sedum und Gras auf Substratdicke von 10 cm
2) Mittelwert über Zufahrt, Weg und Terrasse
3) Versickerung der Hartdachflächen

Tab. 1.1-4: *Wasserhaushaltsgrößen verschiedener Flächennutzungen in Berlin (in % der Jahresniederschlagssumme von 799 mm) (nach* Göbel *et al. 2007; verändert).*

träge zur Grundwasserneubildung 76 % resp. 89 %) in bebautem Gebiet, eine wirksame Möglichkeit, Häufigkeit und Stärke damit eventuell verbundener Überschwemmungen zu minimieren. Sollten Gründächer neben ihren unbestreitbaren klimatischen, lufthygienischen und hydrologischen Vorteilen, die sie für entsprechend ausgestattete Gebäude besitzen, auch großflächig, zum Beispiel auf Stadtquartiersebene klimaverbessernd wirken, sollten möglichst viele, vor allem niedrige Häuser, fassaden- und dachbegrünt werden.

Städtische Überwärmung

Eine besonders markante Eigenschaft des Stadtklimas stellt die städtische Überwärmung dar, die insbesondere während austauscharmer Wetterlagen durch eine höhere Luft- und Oberflächentemperatur in der Stadt als im Umland charakterisiert ist. Diese positive Temperaturdifferenz zwischen Stadt (*S*) und Umland (*U*) ($\Delta T_{S\text{-}U} > 0$ K) wird städtische Wärmeinsel genannt (engl. *Urban Heat Island, UHI*) und sie erreicht höchste Werte nachts. Als Wärmeinseln werden Stadtgebiete deshalb bezeichnet, weil damit ein inselartiges, das heißt flächig begrenztes Auftreten höherer Temperaturen in einer kühleren (Umland-)Umgebung gemeint ist. »Wärmearchipel« wäre der sinnvollere Begriff, da ein Stadtgebiet nicht homogen überwärmt ist, sondern aufgrund der heterogenen Flächennutzungsstruktur durchaus mehrere Wärmezentren aufweisen kann. Dieser Begriff hat sich allerdings in der Fachliteratur nicht durchgesetzt. Die Entstehung und Intensität städtischer Wärmeinseln sind von verschiedenen Einflussgrößen abhängig und korrelieren zum Beispiel positiv mit der Höhe des Versiegelungsgrads, einem großen Verhältnis zwischen Haushöhe und Straßenbreite sowie generell der Einwohnerzahl. Negative Abhängigkeiten ergeben sich hingegen beispielsweise zum Wolkenbedeckungsgrad und zur Windgeschwindigkeit.

Städtische Wärmeinseln lassen sich zwei Großgruppen zuteilen, je nachdem ob sie oberirdisch als Überflurwärmeinsel (an der Bodenoberfläche oder in der urbanen Grenzschicht) oder unterirdisch als Unterflurwärmeinsel (im nahen oder tiefen Untergrund) nachgewiesen werden. *Abb. 1.1-2* enthält exemplarisch Tagesmittelwerte sowohl für eine Überflurwärmeinsel (*UHI*; 2 m ü. Gr.) als auch solche für eine Unterflurwärmeinsel (*SUHI*; -1,25 m u. Gr.).

Die Werte der oberirdischen (*UHI*) und unterirdischen (*SUHI*) Wärmeinsel erreichen maximal jeweils etwa 8 K, allerdings zu verschiedenen Zeiten. Während die Überflurwärmeinsel keinen signifikanten Unterschied zwischen den Sommer- und Wintermonaten zeigt, ergibt sich für die Unterflurwärmeinsel stattdessen eine deutlichere saisonale Abhängigkeit. Ferner unterscheiden sich beide *UHI*s dadurch, dass die täglichen Spannweiten der Überflurwärmeinsel wesentlich größer sind als diejenigen der Unterflurwärmeinsel.

Die Daten zeigen, dass der Untergrund gerade in dichtbebauten Innenstadtgebieten um mehrere Kelvin wärmer sein kann, als der der unbebauten Umgebung. Diese Wärme kann sowohl für die Vegetation standortbestimmend sein, als auch über sinnvoll eingesetzte Wärmetauscher im Rahmen der regenerativen Energienutzung verwendet werden. Da sich die beiden Wärmeinseltypen im Jahresverlauf relativ unterschiedlich zueinander verhalten, böte sich eine thermische Nutzung der Grenzschichtwärmeinsel (*UHI*) eher in den Wintermonaten an, während demgegenüber die Energie der Unterflurwärmeinsel (*SUHI*) in den Sommermonaten vergleichsweise stärker genutzt werden könnte.

Eine detaillierte Analyse und Beschreibung der durch Stadtgebiete verursachten Einflüsse auf die atmosphärische Grenzschicht wird mit Verweis auf Kap.1.3 Christen - in diesem Band) hier nicht vorgenommen.

Nachweis von Stadtklimaeffekten

Bei den in Städten erfassten klimatischen und lufthygienischen Messgrößen handelt es sich grundsätzlich um zusammengesetzte Werte (*W*), die wenigstens aus drei, in unterschiedlichem Maße an *W* beteiligten Einzelkomponenten, bestehen (Lowry 1977). Hierbei handelt es sich um (Oke et al. 2017; Kuttler 2010)

- einen durch die großräumige geographische Lage und das globale Klima vorgegebenen Beitrag (Hintergrundwert *H*),
- eine durch die Oberflächengestalt und die Flächennutzung bestimmte regionale Beeinflussung (Topographiewert *T*), sowie
- einen auf den Urbanisierungsgrad zurückzuführenden Einfluss (Urbanisierungswert *U*).

Diese Beiträge lassen sich in Gl. 2 wie folgt zusammenfassen:

$$W_{itx} = H_{itx} + T_{itx} + U_{itx} \qquad (2)$$

Mit i = Witterungstyp, t = Messzeitpunkt und x = Lage des Messstandortes im Stadtgebiet.

Um den ausschließlich auf die Verstädterung zurückgehenden Einfluss nachweisen zu können, sollte die Möglichkeit bestehen, in einem »Vorher/Nachher Vergleich« die aktuellen Klima- und Luftqualitätsdaten den präurban gewonnenen Messwerten – bei vergleichbarer Wetterlage – gegenüberzustellen. Ein derartiges Vorgehen ist in der Regel jedoch nicht möglich, da Daten, die bis in die Zeit vor einer Stadtgründung zurückreichen und am gleichen Standort erhoben wurden, meist nicht zur Verfügung stehen. Deshalb ist es fast immer notwendig, ausschließlich stadtbedingte Einflüsse auf andere Art und Weise zu ermitteln. Es bieten sich dazu folgende Möglichkeiten an:

- Eine Analyse von Vergleichsmessungen (präurban/urban) an Stadtmodellen mittels physikalischer (Windkanal) oder numerischer Simulationen (mathematischer Modelle),
- Regressionsanalysen für einzelne Klima- und Lufthygieneparameter in Abhängigkeit von der zeitlichen Entwicklung einer Stadtgebietsfläche bzw. deren Einwohnerzahl und
- die Durchführung von stationären und quasigleichzeitigen mobilen Vergleichsmessungen im urbanen und ruralen Bereich.

Werden Messdaten erhoben, sollten diese zur Minimierung des Aufwands auf repräsentative Flächennutzungstypen, die sich durch gleichartiges mikroklimatisches Verhalten und durch ähnliche Luftqualität auszeichnen, begrenzt werden. In der deutschen Stadtklimatologie hat sich für derartige repräsentative »Stadtstrukturtypen« der Begriff »Klimatop« durchgesetzt (VDI 2015).

Da eine Klimatopklassifizierung auf der Kartierung von Bebauungsgrenzen und der Analyse vorhandener repräsentativ erhobener Messdaten beruht, ist eine quantifizierbare und vergleichbare Aussage über die Festlegung von Klimatopen bereits möglich.

In der internationalen Fachliteratur wird auf die Verwendung von Flächennutzungstypen (»landscape series«) zurückgegriffen, die durch verschiedene Indikatoren quantifiziert werden und somit ein präziseres Mittel zur Flächenabgrenzung darstellen. Dazu zählen der Himmelssichtfaktor, der Oberflächenversiegelungsgrad, die mittlere Strömungshindernishöhe, die Oberflächenalbedo, die Wärmeübergangszahl der Oberflächenmaterialien sowie die freigesetzte anthropogene Wärme. Insgesamt vier Gruppen (urban, mixed, agricultural, natural) werden 19 Klassen zugeordnet (local climate zones bzw. thermal climate zones), deren Einteilungskriterien die jeweils festgelegten Schwankungsbreiten der Indikatordaten sind (Stewart & Oke 2012).

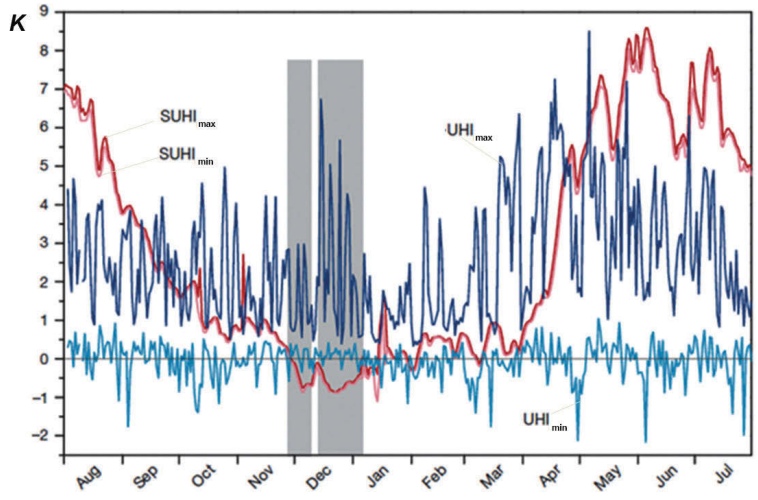


Abb. 1.1-2: *Tagesmittelwerte der oberirdischen (UHI; 2 m ü. Gr.) und unterirdischen (SUHI; -1,25 m u. Gr.) Wärmeinsel in Oberhausen (08/2010-07/2011) (graue Flächen: leichte Schneedecke. Quelle: Müller et al. (2014).*

Städte im globalen Klimawandel

Der globale Klimawandel wird auch in Städten, insbesondere in dicht bebauten Arealen, zu einer weiteren Erhöhung der Luft- und Oberflächentemperaturen führen und dürfte deshalb gerade unter der älteren Bevölkerung einen Anstieg der Morbiditäts- und Mortalitätsraten nach sich ziehen, wie es die Hitzeepisoden der Vergangenheit bereits gezeigt haben. Auch wird eine höhere Temperatur nicht ohne Einfluss auf diejenigen Luftverunreinigungen bleiben, deren Bildungsbedingungen temperaturgesteuert sind, wie Ozon und ultrafeine Partikel (z.B. SOA = *Secondary Organic Aerosol*). Möglichkeiten auf globaler Ebene, dem Klimawandel zu begegnen, werden in einer drastischen Reduktion anthropogener CO_2-Emissionen gesehen, zum Beispiel durch einen geringeren Prokopfverbrauch an Nahrungsmitteln und Energie, insbesondere in den hochentwickelten Industrieländern. Auf lokaler Ebene bieten sich Objekt bzw. Flächen bezogene Maßnahmen an, um zum Beispiel die Luft- und Oberflächentemperaturen durch geeignete Verschattungsmöglichkeiten zu senken. Auch sollte Energie für Kühlung bzw. Erwärmung von Gebäuden eingespart werden, bspw. durch entsprechend angebrachte Wärmedämmungen. Grundsätzlich senken begrünte Flächen die Oberflächentemperaturen, falls der Boden einen ausreichenden Wasservorrat aufweist. Bäume sind – zusätzlich zu ihrem Schattenwurf – stärker wirksam als ausschließlich mit Rasen bedeckte Flächen. Neben einem anzustrebenden höheren Anteil an Grünflächen in Städten, sollte überdies ein ausreichender Frisch-/Kaltlufttransport zwischen Stadt und Umland sichergestellt werden, um warme und meist mit Spurenstoffen angereicherte Stadtluft durch kühle und möglichst saubere Umlandluft zu ersetzen. Gleichwohl muss klar sein, dass man Städte klimatisch nicht in Grünflächen umwandeln kann; allenfalls kann angestrebt werden, die Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Umland gerade in Zeiten des globalen Klimawandels nicht noch stärker ansteigen zu lassen.

Literatur

GÖBEL P., C. DIERKES, H. KORIES, J. MESSER, E. MEISSNER & W. G. COLDEWEY (2007): Einfluss von Gründächern und Regenwassernutzungen auf Wasserhaushalt und Grundwasserstand in Siedlungen.- Grundwasser-Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, 12, 189-200.

KUTTLER W., S. WEBER, J. SCHONNEFELD & A. HESSELSCHWERDT (2007): Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany.- International Journal of Climatology, 27, 2005-2015.

KUTTLER W. (2010): Urbanes Klima, Teil 1. – Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft, 70, Nr. 7/8, 329-340.

KUTTLER W. (2013): Klimatologie. 2. A., UTB Band 3099. 306 S. F. Schöningh, Paderborn.

KUTTLER W., A. MIETHKE, D. DÜTEMEYER, & A.-B. BARLAG (2015): Das Klima von Essen/The Climate of Essen. 249 S. Westarp Wissenschaften, Hohenwarsleben.

KUTTLER W. (2018): Hitzewellen in großen Städten: Folgen für die Gesundheit und Gegenmaßnahmen.- In: Lozan, J. L. S., W. Breckle, H. Grassl, D. Kasang (Hrsg.): Warnsignal Klima: Extremereignisse. 72-78.

LOWRY W. P. (1977): Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis.- Journal of Applied Meteorology, 16, 129-135.

MÜLLER N., W. KUTTLER & A.-B. BARLAG (2014): Analysis of the subsurface urban heat island in Oberhausen, Germany.- Climate Research, 58, 247-256.

OKE T. R., G. MILLS, A. CHRISTEN & J. A. VOOGT (2017): Urban Climates. 525 S. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

STEWART I. D. & T. R. OKE (2012): Local climate zones for urban temperature.- A new classification system for urban studies.- Bulletin of the American Meteorological Society, 93), 1879-1900.

VAUTARD R., P. YIOU & G. J. VAN OLDENBORGH (2009): Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years.- Nature Geoscience 2, 115-119.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2015): Richtlinie - Umweltmeteorologie: Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen; VDI RL 3787, Blatt 1. Beuth Verlag, Berlin.

WESSOLEK G. (2001): Bodenüberformung und -versiegelung. Handbuch Bodenkunde, 11. Erg.Lfg. 04/01, 1-29.

WIENERT U. & W. KUTTLER (2005): The dependence of the urban heat island intensity on latitude – a statistical approach.- Meteorologische Zeitschrift, 14, 677-686.

WITTIG R., W. KUTTLER & O. TACKENBERG (2014): Urban-industrielle Lebensräume.- In: Mosbrugger, G. Brasseur, M. Schaller, B. Stribrny (Hrsg.): Klimawandel und Biodiversität. Folgen für Deutschland. 2.A., 290-307.

Kontakt:

Prof. em. Dr. Wilhelm Kuttler
Angewandte Klimatologie
Universität Duisburg-Essen
wiku@uni-due.de

Kuttler, W. (2019): Stadtklima: Definition, Charakteristika. Nachweismöglichkeiten. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 21-27. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.03.

1.2 Zur Geschichte der Stadtklimatologie

Wilhelm Kuttler

Der Beitrag beleuchtet die über 2000 - jährige Geschichte der Stadtklimaforschung und stellt anhand verschiedener Meilensteine die wechselvolle Geschichte dieses Teils der Umweltmeteorologie heraus. Es dürften wohl die Inder und Römer gewesen sein, die sich dem Problem der Überwärmung und insbesondere dem der Luftverschmutzung in ihren aufstrebenden städtischen Siedlungen zuerst annahmen. Wesentliche Beachtung stadtklimatischer Probleme erfuhren die wachsenden Städte des Mittelalters. Nach Zeiten der überwiegend beschreibenden Stadtklimaforschung konnte mit Entwicklung der Technik eine mehr analytisch und letztlich modellorientiert ausgerichtete Beschäftigung mit diesem anthropogenen Klimatyp in jüngster Zeit erfolgen.

About the History of Urban Climatology: *The article illuminates more than 2000 years of urban climate research and highlights the eventful history of this part of environmental meteorology by presenting various milestones. It were probably the Indians and Romans who first addressed the problem of overheating and, in particular, air pollution in their up-and-coming urban settlements. The growing cities of the Middle Ages received considerable attention for their urban climatic problems. After times of predominantly descriptive urban climate research, the development of technology allowed a more analytical and ultimately model-oriented study of this anthropogenic climate type in recent times.*

Die Stadtklimatologie beschäftigt sich mit der raum-zeitlichen Diagnose und Prognose der klimatischen und lufthygienischen Umweltbedingungen sowie der Bewertung der human-biometeorologischen Wirkungskomplexe in Städten. Sie ist – heutzutage – ein grundlagen- und anwendungsbezogener Forschungsbereich. Während in Kap. 1.1 Kuttler - in diesem Band) die Charakteristika des Stadtklimas behandelt wurden, soll in diesem Abschnitt ein kurzgefasster Überblick zur Entwicklung der Stadtklimatologie - unter besonderer Berücksichtigung der mitteleuropäischen Forschungsgeschichte und nach zeitlichen Gesichtspunkten geordnet - von ihren Anfängen bis heute gegeben werden. Da der Begriff »Stadt« nicht eindeutig definiert ist und sich über die Jahrhunderte vielfach wandelte (vgl. hierzu Osterhammel 2011; Heineberg 2017), soll hier der Einfachheit halber eine Stadt als größere Siedlung in Bezug auf ihre Einwohnerzahl aufgefasst werden.

Die Anfänge

Die wissenschaftliche Beschäftigung mit den Auswirkungen von Städten auf das Lokalklima und die Luftqualität lässt sich auf Basis des vorhandenen Schrifttums für einen Zeitraum von etwa 2000 Jahren – wenn auch gelegentlich lückenhaft – zurückverfolgen. Die ersten nachweislich schriftlichen Berichte widmeten sich vornehmlich dem Problem der bodennahen Luftverschmutzung – im Wesentlichen durch Rauch –, aber auch der im Vergleich zum kühleren Umland auftretenden Überwärmung, deren Ursache man in der Häufung von Baumassen und ihrer Anordnung zueinander relativ früh erkannte. So finden sich erste Arbeiten zu diesem Thema in indischen und römischen Quellen. Für indische Städte wurde unter anderem der Frage nachgegangen, wie sich die Ausrichtung von Straßen in Abhängigkeit von der solaren Bestrahlungsdauer und -stärke auf die bebaute Fläche dieses Subkontinentes auswirkt. Es handelte sich hierbei um ein naheliegendes Problem, da indische Städte auf Grund ihrer geographischen Lage zwischen etwa 10 °N - 30 °N einer besonders intensiven Sonnenstrahlung ausgesetzt sind. Während einerseits der Schutz vor Sonnenstrahlung in Städten als wichtig angesehen wurde, gab es andererseits zahlreiche Arbeiten über die »Verräucherung« der bodennahen Luftschicht durch Herdfeuer sowie durch den Rauch von Schmelzöfen und Töpfereien mit ihren niedrig gelegenen Quellhöhen, zum Beispiel in Rom. Mit dem Begriff »*gravius caelum*« (»schwerer Himmel«), der auf Seneca zurückgehen soll, wurde die fast permanent vorhandene Dunstglocke über dieser Stadt beschrieben, der man sich, so Seneca, nur durch Flucht in die umliegenden Berge mit sauberer Luft entziehen konnte (siehe hierzu Neumann 1979; Yoshino 1990/91).

Als bahnbrechend für die damalige Zeit dürfte das Werk des römischen Architekten und Bauingenieurs Marcus Vitruvius (75 v. Chr.-26 v. Chr.) angesehen werden, der in »*De Architectura libri decem*« (»Zehn Bücher über Architektur«) das damalige Wissen über die Anlage und die Struktur von Städten, auch unter gelegentlichen Hinweisen auf das Lokalklima und die Luftqualität, zusammengetragen und erste Hinweise zu einer Bauordnung, einer frühen Stadtplanung, gegeben hat. Sein umfängliches Kompendium galt über Jahrhunderte als Lehrbuch der Stadtbaukunst, das Curt Fensterbusch ins Deutsche übersetzte (Fensterbusch 1991).

Hoch- und Spätmittelalter, frühe Neuzeit

Auf der Grundlage des bekannten Rechtsgrundsatzes des Mittelalters »Stadtluft macht frei nach Jahr und Tag« zog es viele Menschen, zumeist Leibeigene, in die Städte der damaligen Zeit, die dadurch nicht mehr von ihrem Dienstherrn als Eigentum betrachtet werden konnten. Dies führte zu starken Bevölkerungzunahmen

in den Städten, wo eine Vielzahl neuer Wohnhäuser mit zusätzlichen Herd- und sonstigen Feuerungsstellen entstanden, die, meist mit Holz oder qualitativ schlechter Kohle beschickt, zu einer starken bodennahen Verräucherung der Luft führten. Für die damalige Zeit kann London als Paradebeispiel einer Stadt mit starker »Luftverpestung« und daraus resultierenden ernsten Gesundheitsproblemen unter der Bevölkerung gelten.

Aus diesem Grund wandte sich der englische Architekt, Gartenbauer und Tagebuchschreiber John Evelyn (1620-1706) im Jahr 1661 in einem Brief an König Charles II. In diesem Schreiben schilderte Evelyn die katastrophalen Probleme der Londoner Luftverschmutzung und die damit verbundenen Gesundheitsbeeinträchtigungen, unter denen die Bevölkerung zu leben und zu leiden hatte. Dieser Brief trug den Titel »*Fumifugium - The Inconveniencie of the Aer and Smoak of London dissipated together with some remedies*« (etwa: »Die Unannehmlichkeiten der Luft und des Rauchs von London, die durch einige Abhilfemaßnahmen verschwanden«). Der Text war für die damalige Zeit absolut wegweisend und fand durch Veröffentlichung als Monographie später weite Verbreitung (Evelyn 1661). Grundsätzlich resultierte das Luftverunreinigungsproblem Londons daraus, dass für Koch- und Heizzwecke große Mengen an qualitativ schlechter Kohle (mit hohem Schwefelanteil) verbrannt wurde und der dabei entstehende beißende Rauch nicht in hohen Schornsteinen abgeführt werden konnte, sondern meist über Löcher in den Dächern (»Rauchküchen«) der flachen Häuser abzog, wodurch insbesondere der bodennahen Verräucherung Vorschub geleistet wurde. Die schlechte Luftqualität wurde ferner durch die meist hohe Luftfeuchtigkeit verstärkt, denn London liegt im Themsetal und an der nahen Nordsee, wodurch sich insbesondere im Herbst und Winter der berüchtigte „City Fog" bildete. Londons Bevölkerung litt auch noch weitere 300 Jahre unter der Luftverschmutzung. Die Stadt war schließlich namensgebend für den berüchtigten schwefelsauren »London-Smog« (Kuttler 1979 a). In den Jahren 1924 sowie 1952 und während weiterer Smogepisoden starben zusätzlich mehrere tausend Bewohner der Stadt an der schlechten Luftqualität (Kuttler 1979 b).


FUMIFUGIUM:
OR
The Inconveniencie of the AER
AND
SMOAK of LONDON
DISSIPATED.
TOGETHER
With some REMEDIES humbly
PROPOSED
By J. E. Esq;
To His Sacred MAJESTIE,
AND
To the PARLIAMENT now Assembled.
Published by His Majesties Command.
Lucret. l. 5.
Corbenámque gravis vis, atque odor insinuatur
Quam facile in cerebrum? ——
LONDON,
Printed by W. Godbid for Gabriel Bedel, and Thomas Collins,
and are to be sold at their Shop at the Middle Temple Gate
neer Temple-Bar. M. DC. LXI.

Abb. 1.2-1: *Titelseite der von John Evelyn verfassten Schrift »Fumifugium« (Quelle: http://libraries.ucsd.edu/speccoll/weather/b4162440.htm).*

Abb. 1.2-1 zeigt den Abdruck der Titelseite des Werkes von John Evelyn, das in drei Teile untergliedert war. In Teil 1 wird das Problem der Luftverunreinigung im Großraum London beschrieben und die Verbindung zur menschlichen Gesundheit hergestellt. Teil 2 beschäftigt sich mit der Beseitigung und Lösung des Luftverschmutzungsproblems und empfiehlt zum Beispiel, stark emittierende Kalksteinwerke sowie Brauereien in Gebiete außerhalb von London zu verlegen. In Teil 3 versammelt Evelyn Vorschläge zur Verbesserung der Luft, indem er – schon überaus weitsichtig für die damalige Zeit - empfiehlt, Grüngürtel um London anzulegen und den Handel mit bestimmten luftbelastenden Produkten im Londoner Umland anzusiedeln. Hier fühlt man sich an die Verordnungen des Jahrhunderte später gegründeten Siedlungsverbandes Ruhrkohlenbezirk (SVR) in Nordrhein-Westfalen aus dem Jahr 1920 erinnert, dessen Aufgabe es u. a. war, den Bestand an regionalen Grünzügen innerhalb des stark industrialisierten Ruhrgebietes zu sichern, um die Lebensqualität der Bewohner zu verbessern.

Neuzeit

Das sich weltweit entwickelnde Wirtschaftswachstum und die damit verbundene ungebremste Stadtentwicklung verschärfte nicht nur das Problem der Luftverschmutzung, sondern führte auch zu starker sommerlicher Hitzebelastung der Bevölkerung in den dicht

bebauten Stadtquartieren. Hiervon waren zunächst hauptsächlich Großstädte der mittleren Breiten betroffen, so zum Beispiel New York und Philadelphia, wo Ärzte während heißer Sommer auf die negativen Auswirkungen des thermischen Stresses für die Stadtbewohner hinwiesen. Die Enge der Bebauung, die Höhe der Häuser und die weitflächige Versiegelung der urbanen Flächen, die sich tagsüber aufheizten, ließen auch nachts kaum eine Abkühlung durch Zufuhr kühler Umlandluft zu (Jankovic 2013, Jankovic & Hebbert 2012).

Eine erste systematische und bis dahin nicht gekannte detaillierte Untersuchung zu den zahlreichen Facetten des Stadtklimas legte schließlich der englische Apotheker Luke Howard (1772-1864; *Abb. 1.2-2*) für London vor, das zur damaligen Zeit neben Paris die größte Stadt Europas war. Howard war in Meteorologiekreisen kein Unbekannter, denn er hatte bereits 1804 eine von ihm selbst illustrierte Wolkenklassifikation veröffentlicht, die im Wesentlichen heute noch verwendet wird. .

Howard veröffentlichte im Jahre 1833 in zweiter Auflage sein dreibändiges Werk (erste Auflage 1818) »*The Climate of London*«, dem im Laufe der Jahre weitere Auflagen folgten. Das Buch war zur damaligen Zeit ein Beststeller.

Howard maß an den von ihm persönlich betriebenen Stationen innerhalb und außerhalb Londons alle meteorologischen Elemente, sogar den Tau und die Verdunstung. Die von ihm verwendeten Messgeräte wurden in seinem Buch genauestens beschrieben. Wie es im Titel seiner zweiten Auflage heißt, dürfte es sich hierbei um die ersten mehrjährigen Vergleichsmessungen zum Nachweis stadtklimatischer Verhältnisse handeln (»*Meteorological Observations made in the Metropolis and at various Places around it*«, Howard 1833). So führte er die in der Innenstadt von London erfassten Lufttemperaturen auf die starken Emissionen des Hausbrands und der Industrie zurück.

Eine Erkenntnis aus den Vergleichsuntersuchungen zwischen Stadt und Umland war, dass das »artifizielle«, durch die Stadt veränderte Klima, nicht dasjenige der unbebauten Umgebung repräsentierte, also dem natürlichen Klima, entsprach. In landesklimatische Vergleiche durften somit die in Städten gewonnenen Daten, die ja einer künstlichen Umgebung entstammten und demzufolge einem eigenen »anthropogenen« Klimatyp zugeordnet werden mussten, nicht einfließen.

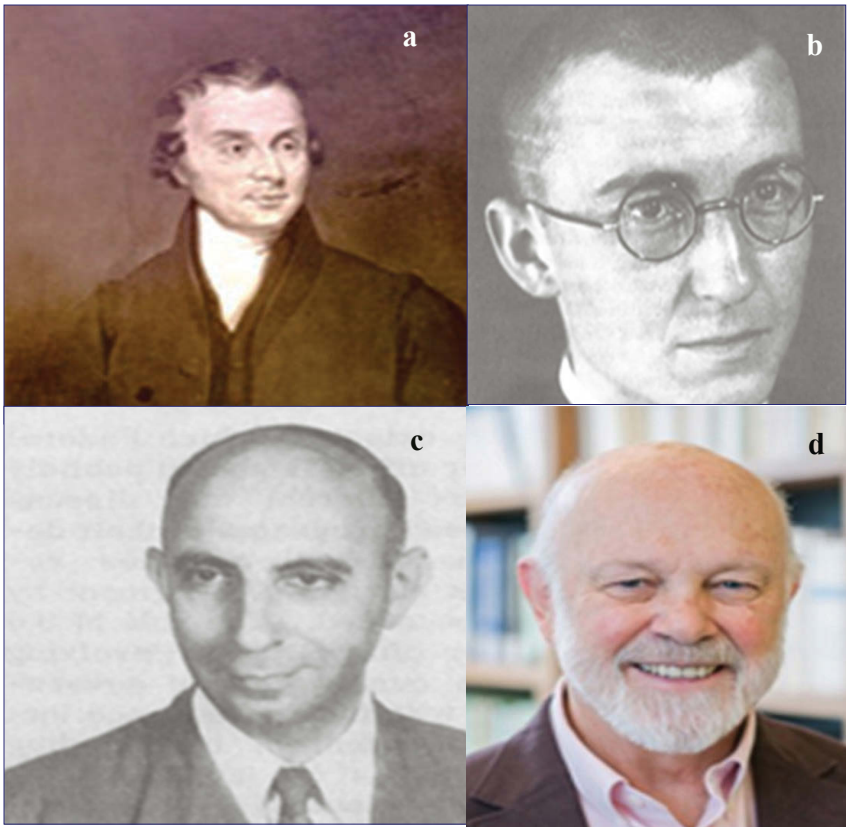


Abb. 1.2-2: *Bedeutende Stadtklimatologen ihrer Zeit: a) Luke Howard (1772-1864) (Foto: Wikipedia), b) Pater Albert Kratzer (1905-1975) (Foto: Fam. Kratzer), c) Helmut E. Landsberg (1906-1985) (Foto: Wikipedia) und d) Tim R. Oke (*1941)(Foto: © 1994-2019 The University of British Columbia. All rights reserved..*

Stadtklimauntersuchungen wurden auch anderenorts durchgeführt und in zahlreichen wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert. So in Paris durch Emilien Renou (1815-1902), der im Rahmen seiner Messungen auf das Problem der verlangsamten abendlichen Abkühlung des Stadtkörpers auf Grund der hohen Wärmespeicherfähigkeit der Baumaterialien hinwies, wofür später der Begriff »*Urban Heat Island*« (*UHI*; städtische Wärmeinsel) eingeführt wurde (zitiert in Landsberg 1981). Oke et al. (2017) vermuten, dass der Begriff »städtische Wärmeinsel« zum ersten Mal 1947 in einer Fachpublikation verwendet wurde (Balchin & Pye 1947).

Eine führende Rolle in der weiteren systematischen Erforschung des Stadtklimas übernahmen mit Ausgang des 19. Jhdts. deutsche und österreichische Wissenschaftler, wie Gustav Hellmann, Julius Hann, August Schmauss, Wilhelm Schmidt und Albert Peppler.

So hatte sich Julius Hann, der übrigens später mit Reinhard Süring das umfangreiche »Lehrbuch der Meteorologie« (Hann & Süring 1915) in mehreren Bänden verfasste und herausgab, schon früh mit den »Temperaturunterschieden zwischen Stadt und Land«beschäftigt (Hann 1885, 1895). In diesen Veröffentlichungen stellte er sorgfältige Messergebnisse vor, bei deren Auswertung auch die unterschiedlichen Stationshöhen berücksichtigt wurden. Die Messungen der (Luft-)temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland führte er für Wien, Budapest, München, Paris und sogar Calcutta durch. Dabei wies er auf ein prägendes Element stadtklimatischer Messungen hin, das vielfach nicht beachtet wurde und heutzutage leider auch manchmal noch übersehen wird: Die »Temperaturüberschüsse« der Städte sind in erster Linie nicht von deren Größe abhängig, sondern von »der nächsten Umgebung der Station« (Hann 1885, S. 459). Das ist u. a. der Grund dafür, dass einfache Korrelationen zwischen einer Stadtgröße (dargestellt zum Beispiel durch die Einwohnerzahl) und der entsprechenden *UHI* nur geringe Varianzerklärungen erreichen (z. B. Kuttler 2012).

Einen wesentlichen Impuls in Bezug auf die Beschäftigung mit der Chemie der Atmosphäre, insbesondere auch mit den Problemen der Stadtluft und der städtischen Niederschläge (»*Acid Rain*«), lieferte der Chemiker Robert Angus Smith mit seinem 600 Seiten starken Buch über »*Air and Rain. The Beginnings of a chemical Climatology*« (Smith 1872). Sein umfangreiches Kompendium enthält eine Fülle an Messdaten, die nicht nur in England, sondern in zahlreichen Städten Mitteleuropas gewonnen wurden und die dazu auch erste Ergebnisse zur Qualität des Innenraumklimas und der Innenraumluft präsentierten. Das Buch setzte einen Meilenstein für die damalige Zeit.

Zahlreiche zum Teil auf langjährigen Reihen basierende Untersuchungen zum Stadtklima wurden beispielsweise in Berlin (Behre 1908; später durch Hupfer & Chiemlewski 1990) sowie Stuttgart (Knauss 1901) durchgeführt. In der sich durch eine komplexe Topographie auszeichnenden Stadt Stuttgart erkannte man, dass gerade eine Siedlung in gegliedertem Gelände einer besonderen Zuwendung durch die Stadtklimaforschung bedurfte und richtete bereits 1938 eine Stadtklimatologieabteilung ein – eine für die damalige Zeit in Deutschland absolute Seltenheit. Unter den verschiedenen Leitern dieser Einrichtung ist insbesondere Jürgen Baumüller zu nennen, der die lufthygienischen und stadtklimatischen Arbeiten über Stuttgart nicht nur national, sondern auch international zum Nutzen der Entscheidungsträger in anderen Städten über Jahrzehnte bekanntmachte (Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie).

Die vorgenannten Veröffentlichungen bildeten zu Beginn des 20. Jhdts. auch die Grundlage dafür, die gewonnenen Erkenntnisse grundsätzlich stärker im praxisorientierten Bereich einzusetzen (vgl. hierzu auch *Tab. 1.2-1*). Maßgeblich befördert hat diesen Zweig der angewandten Stadtklimatologie der damalige Meteorologe und Abteilungsvorsteher des Preußischen Meteorologischen Institutes in Berlin, Prof. C. Kassner. Kassner veröffentlichte nämlich im Jahre 1910 seine wegweisende Schrift zum Thema »Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaus« (Kassner 1910). In ihr stellte er den Zusammenhang zwischen Städtebau, Klima und Luftqualität her und beschrieb nicht nur, wie man in verschiedenen Klimazonen klimaadäquat baut, sondern setzte sich auch unter stadtklimatischen Aspekten mit den mitteleuropäischen Stadtstrukturen auseinander.

In der weiteren Entwicklung der Stadtklimaforschung widmete man sich in zunehmendem Maße auch der Analyse vertikaler Lufttemperaturprofile über Städten im Vergleich zum Umland. Erste Messungen wurden hierzu an hohen Türmen durchgeführt, zum Beispiel in Leipzig.

Eine absolute Neuerung hinsichtlich des Methodeninventars stellten die offensichtlich zuerst von Wilhelm Schmidt in Wien 1927 (Schmidt 1930) und dann 1929 von Albert Peppler in Karlsruhe (Peppler 1929) durchgeführten Messfahrten mittels Kraftfahrzeugen zur horizontalen Verteilung der Lufttemperatur dar, die an zahlreichen Punkten innerhalb und außerhalb der Stadt mit Quecksilberthermometern er-

fasst wurde. Exemplarisch wird hier das Ergebnis von vier Lufttemperaturmessfahren durch Karlsruhe am 23.02.1929, jeweils morgens und abends, in West-Ost und in Nord-Süd Richtung verlaufend, dargestellt (*Abb. 1.2-3*). Hieran wird das bekannte stadtklimatische Faktum deutlich, dass sich die städtische Wärmeinsel im Binnenland Mitteleuropas im Allgemeinen nachts stark und am Tage höchstens schwach ausbildet.

Auch in Japan begann man sich zum Beginn des 20. Jhdts. für das Stadtklima, insbesondere für das von Tokio, zu interessieren. So wurden in ersten Publikationen der Niederschlag in Städten (1914 durch Fujiwara) sowie die städtische Wärmeinsel (1922 durch Matoda; beide Zitate in Yoshino 1990/91) analysiert.

Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung der Stadtklimatologie wurde durch die Dissertation des deutschen Benediktinerpaters Albert Kratzer im Jahr 1937 gesetzt. Kratzer (*Abb. 1.2-2*) fasste die bis dahin in Fachzeitschriften publizierte, aus über 200 Einzelveröffentlichungen bestehende Literatur zum Stadtklima nach übergeordneten Gesichtspunkten zusammen. Die weitere stürmische Entwicklung der Stadtklimatologie zeigt sich auch daran, dass Kratzer in der zweiten Auflage seines Buches (1956) – trotz der dazwischenliegenden Kriegsjahre – mehr als 560 Literaturzitate verarbeiten konnte. Kratzer widmete sich in der Neuauflage anhand der von ihm ausgewerteten Literatur neben der Veränderung der meteorologischen Elemente durch Städte auch dezidiert dem Problem der Qualität der Stadtluft. So stellte er für zahlreiche amerikanische und deutsche Städte Schwebstaubanalysen (»Kerne in der Luft«) zusammen und verglich auch die Staubbelastung zwischen Werktagen und Wochenenden. Ferner äußerte er die Vermutung, ob nicht die immense Freisetzung an Staubteilchen dazu führen könnte, weltweit die Albedo von Gletscheroberflächen derart zu verringern, dass diese verstärkt abschmölzen. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch der frühe Hinweis von Plaß (zitiert in Kratzer 1956) der besagt, dass aufgrund des außerordentlich starken CO_2-Ausstoßes durch Kohleverbrennung in Städten, Waldbeseitigung und Landnutzungsänderung 6 Mrd. t CO_2 zusätzlich in die Atmosphäre emittiert werden, wodurch sich die Atmosphärentemperatur in den nächsten 125 Jahren (ab 1953 gerechnet) beträchtlich erhöhen sollte. Zudem stellte Kratzer Berechnungen und Überlegungen an, welchen Anteil die anthropogene Wärmefreisetzung (im Wesentlichen durch Kohleverbrennung) an den natürlichen Strahlungsflüssen hat. Die von ihm zusammengetragenen Ergebnisse zeigten für Wintertage, dass die künstliche Wärmeerzeugung in den damaligen Städten gleichhohe Werte wie die aus der natürlichen Strahlung resultierenden erreicht.

Der Schwede Sundborg (1950) dürfte der erste Stadtklimatologe gewesen sein, der erfolgreich statistische Methoden anwandte, um die Größe der städtischen Wärmeinsel aus verschiedenen Variablen herzuleiten.

Auch die Untersuchung des auf den Menschen bezogenen Bioklimas einer Stadt, heutzutage als Human-Biometeorologie bezeichnet, wurde systematisch in der Mitte des 20. Jhdts. vorangetrieben. Maßgeblich daran beteiligt waren F. Steinhauser, O. Eckel und F. Sauberer. In ihrem dreibändigen Werk zum »Klima und Bioklima von Wien« (Steinhauser et al. 1955, 1957, 1959) verglichen sie Messwerte von Standorten inner-

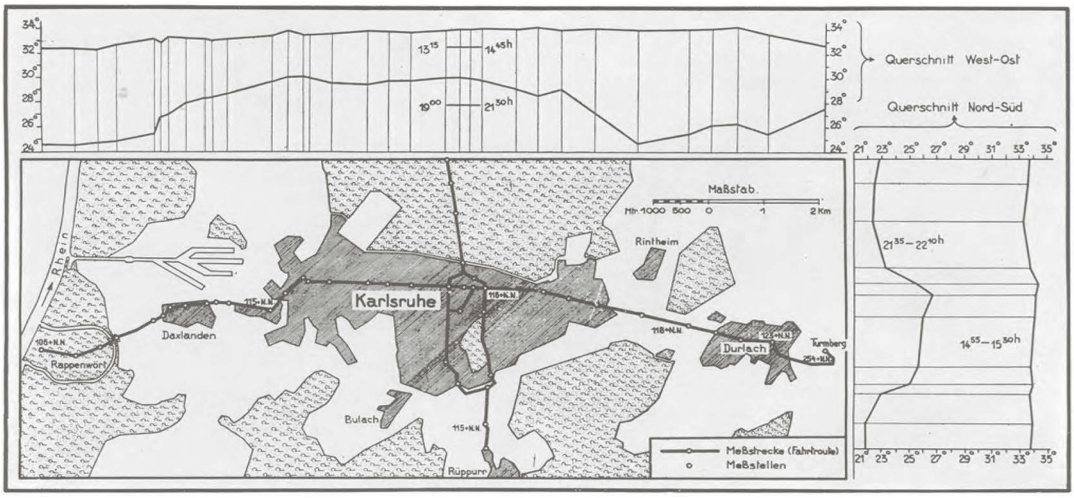


Abb. 1.2-3: *Streckenverläufe mobiler Messfahrten in Karlsruhe zur Aufnahme der Lufttemperatur morgens und abends am 23.02.1929 (Quelle: Peppler 1929).*

halb und außerhalb Wiens miteinander und arbeiteten Unterschiede heraus. Ihr Ziel war es, »eine für die Praxis bestimmte Sammlung von Ergebnissen meist langjähriger, aber auch kürzerer Beobachtungreihen« (Steinhauser et al. 1955, S. 3) vorzulegen. Während Teil I umfängliche Daten zu den wichtigsten meteorologischen Elementen enthält, Teil II die Auswertungen zu den säkularen Änderungen des Klimas sowie »Sonderbearbeitungen für Zwecke der Bautechnik und der Großstadthygiene« (Steinhauser et al. 1957, S. 47) wie Schlagregen, Nebel und die Verteilung des Stadtdunstes umfasst, widmet sich Teil III u. a. der Analyse trocken und nass deponierter Luftverunreinigungen (SO_2, SO_4, CO_2, CO, O_3) sowie der Radioaktivität, des Keimgehalts der Luft und der Verbreitung von Flechten als Bioindikatoren zur Angabe der Luftqualität. Die Vielzahl der hier vorgelegten Ergebnisse zum Thema Bioklima der Stadt dürfte ein Alleinstellungsmerkmal für die damalige Zeit darstellen. Jahrzehnte später wurde für die Stadt Wien eine erste, sehr umfängliche und richtungsweisende »anwendungsorientierte Klimatographie« (»Klimaatlas«) angefertigt, in der auch die thermisch-hygrische Befindlichkeit des Menschen, sogar nach Geschlechtern unterteilt, untersucht wurde (Auer et al. 1989).

Einen wesentlichen Schub zum Verständnis der stadtbedingten Einflüsse auf die Niederschlagsverhältnisse stellt das in St. Louis, Missouri, USA, zwischen 1971 und 1975 durchgeführte Metropolitan Meteorological Experiment (METROMEX) dar. Mit Hilfe der Analyse der über mehrere Jahre erhobenen Daten des sehr umfangreichen Messnetzes (etwa 250 Stationen) sollten u. a. Fragen nach der Höhe des Einflusses einer Großstadt auf das Niederschlags- und Gewittergeschehen beantwortet werden sowie die dafür verantwortlichen physikalischen Ursachen benannt werden können. Im Ergebnis wurden sowohl Niederschlags erhöhende als auch die Gewitterhäufigkeit verstärkende stadtbedingte Effekte erkannt (Changnon 1981). Der amerikanische Klimatologe William P. Lowry war der erste, der sich auch in diesem Zusammenhang mit der Frage beschäftigte, welche klimatischen Einzelparameter den gemessenen »zusammengesetzten« Stadtklimawert letztlich bestimmen. Er unterschied dabei eine globalklimatische, topographische und urbane Wirkgröße (Lowry 1977).

In den Tropen/Subtropen dürften Sani Sham in den 1970er Jahren in Malaysia (Sham (1979, 1990/91), Ernesto Jauregui in Mexico (Jauregui 1973) sowie die Arbeitsgruppe um Moriyama in Japan (Moriyama 1988) die ersten gewesen sein, die sich mit dem Stadtklima in diesen Klimazonen beschäftigt haben. So hat zum Beispiel Moriyama den stadtklimatischen Planungsaspekt (»Klimaatlanten für Städte«) in Japan eingeführt. Darüber hinaus war er auch Mitinitiator des seit 1995 meist dreijährig stattfindenden Deutsch-Japanischen Stadtklimatologietreffens.

Der Stand der Stadtklimaforschung in den 1980er Jahren wurde in der von Helmut Landsberg publizierten Monographie »*The Urban Climate*« (Landsberg 1981) zusammengefasst; hierin wurde neben der Behandlung der wichtigsten meteorologischen Ele-

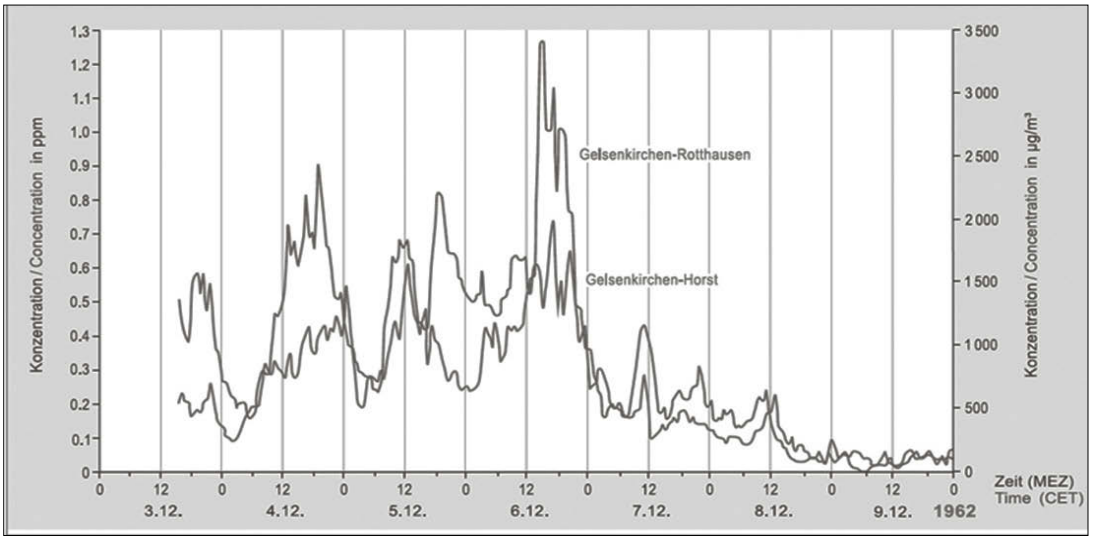


Abb. 1.2-4: *Stundenmittelwerte der SO_2-Konzentrationen an zwei Messstationen im Ruhrgebiet während der Smogepisode vom 3. bis 9. Dezember 1962. Man beachte die Maxima, die in G.-Rotthausen am 6.12. nachmittags fast 3500 µg/m³ erreichten (hier nach Kuttler et al. 2015).*

mente und ihre Beeinflussung durch große Städte auch auf den Aspekt der Stadtplanung aus meteorologischer Sicht eingegangen. Letztgenannter Faktor spielte vielerorts eine immer stärker werdende Rolle wie entsprechende Publikationen zum Beispiel »Lufthygiene und Klima - Ein Handbuch zur Stadt- und Regionalplanung« (Schirmer et al. 1993) bzw. »Stadtklima und Luftreinhaltung« (Helbig et al. 1999) belegen.

Vor dem Hintergrund der in einigen Industriegebieten Mitteleuropas (und auch Nordamerikas) vor allem seit der Mitte des 20. Jhtds. verstärkt auftretenden Smogepisoden, die überwiegend im Winterhalbjahr während austauscharmer Wetterlagen mit hohen Ruß- und SO_2-Konzentrationen einhergingen (beachte das Maximum in *Abb. 1.2-4*), wurde dem Aspekt der »Immissionsklimatologie« größere Beachtung geschenkt (vgl. hierzu Kuttler 1979 b) und in der Folgezeit Versuche unternommen, durch entsprechende Filtersysteme in Industrieschornsteinen und deren Erhöhungen die Luftqualität zu verbessern.

In besonderem Maße haben in der zweiten Hälfte des 20. Jhdts. die Veröffentlichungen von Tim Oke (*Abb. 1.2-2*) die Stadtklimaforschung vorangetrieben. Oke und seine Arbeitsgruppe haben eine Vielzahl an Aufsätzen sowie Bücher zu den verschiedenen Facetten des Stadtklimas publiziert und damit der Stadtklimatologie weltweit über Jahrzehnte einen kräftigen Entwicklungsschub verliehen (Oke et al. 2017).

Auch Einzelprojekte, wie dasjenige zum »Stadtklima Bayern« (Mayer 1988) sowie das später durchgeführte Basel Urban Boundary Layer Experiment (BUBBLE) zur Analyse der Meteorologie der urbanen Grenzschicht (Rotach et al. 2005) führten zu einem immer besseren Verständnis vor allem der dreidimensional ablaufenden Prozesse innerhalb der Stadtatmosphäre (vgl. hierzu auch *Tab. 1.2-1*).

Seit den 1970/80er Jahren entwickelte sich die human-biometeorologische Forschung auch durch Gründung der *International Society for Biometeorology* (ISB) in zunehmendem Maße. In Deutschland waren es insbesondere Gerd Jendritzky (Jendritzky et al. 1979) sowie Helmut Mayer (Mayer & Höppe 1987), die wegweisende Arbeiten in Hinblick auf nicht nur physikalisch, sondern auch körperphysiologisch zu berücksichtigende Reaktionen auf den thermischen Wirkungskomplex veröffentlichten.

Vor dem Hintergrund einer immer ausgereifteren stationären und mobilen Messtechnik, der stürmischen Weiterentwicklung numerischer und physikalischer Modellierung sowie der zunehmenden Nutzung von Satellitendaten trat die Angewandte Stadtklimatologie neben der Grundlagenforschung als praxisorientierte Teildisziplin auf, da die Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Meteorologie bzw. Klima, Luftqualität und Planung für die Entscheidungsträger im Städtebau eine immer bedeutendere Rolle spielten (s. *Tab. 1.2-1*). In Deutschland schlugen sich diese

Tab. 1.2-1: *Fortschritte der Stadtklimaforschung im 20./21. Jahrhundert (Yoshino 1990/91, Oke et al. 2017, ergänzt und verändert).*

Anfang bis Mitte 20. Jahrhundert:
- Überwiegend deskriptiv gehaltene Klimatographien einzelner Städte

Mitte bis Ende 20. Jahrhundert:
- Stürmische Entwicklung der Stadtklimatologie dokumentiert in zahlreichen Bibliographien, z. B. durch die *World Meteorological Organisation* (WMO) durch Oke (1974 und 1979)
- WHO (*World Health Organisation*) durchgeführte Tagungen (z. B. Brüssel 1968, »Urban Climates and Building Climatology«) sowie Symposien der IFHP (*International Federation for Housing and Planing*)
- Verfeinerung und Verbesserung von Messgeräten erlaubten bessere methodische Differenzierung von und stärkere analytische Herangehensweise an Stadtklimauntersuchungen
- Dreidimensionale Erfassung klimatischer und lufthygienischer Parameter in der urbanen Grenzschicht
- Verstärkte Nutzung von Fernerkundungsmethoden
- Numerische Simulationen und Windkanalanalysen
- Anfertigung von Stadtklimakarten, Einführung des Begriffes Klimatop (in Deutschland); Aufkommen von Stadtklimaatlanten (Ren et al. 2011).
- Analyse stadtbedingter Niederschläge
- Qualitative und quantitative Analyse anthropogener Wärme (Industrie, Gebäudebeheizung, Kfz-Verkehr, metabolische Wärme)
- Typisierung der urbanen Wärmeinseln (Untergrund, Oberfläche, Atmosphäre)
- Verstärkte Durchführung von Stadtklimaanalysen auch in Entwicklungsländern
- Entstehung verschiedener Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI RL) im Fachbereich »Umweltmeteorologie«
- Prozessorientierte Arbeiten zu urbanen Austauschprozessen (Flußmessungen meteorologischer und lufthygienischer Parameter mittels Eddy Kovarianz Methode)
- Ausweitung human-biometeorologischer Forschung; Schaffung von Indikatoren zum thermischen Wirkungskomplex (z. B. PET, pt, UTCI); Festlegung von Grenzwerten zum lufthygienischen Wirkungskomplex

Ende 20. Jahrhundert / Anfang 21. Jahrhundert
- Stadtklima und globaler Klimawandel; Mitigations- und Adaptationsstrategien für Städte
- Verstärktes Aufkommen räumlich hochauflösender numerischer Modelle für stadtmeteorologische Vorhersagen (insbesondere das auf der Large Eddy Simulation LES beruhende und in Entwicklung befindliche Modell PArallelized LES Model PALM for urban application (PALM-4U; Raasch & Schröter 2001; Scherer et al. 2019)

Ergebnisse nicht nur in entsprechenden Publikationen nieder, sondern finden auch bis in die Gegenwart Eingang in deutsche gesetzliche Regelwerke sowie in verschiedene praxisorientierte Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), insbesondere denen der Umweltmeteorologie (z. B. VDI 3785, 3787 3789), die sich vorrangig auf die Umweltmedien »Klima und Luft« beziehen.

Die stadtklimatische Forschung wird gegenwärtig durch zahlreiche Symposien und Tagungen weltweit lebendig gehalten. Wesentlich war auch die Gründung der *International Association for Urban Climate* (IAUC) im Jahre 2003 mit ihrer ersten Vorsitzenden, der Neuseeländerin Sue Grimmond, sowie die aus verschiedenen Vorläufertreffen hervorgegangene, dreijährig stattfindende *International Conference on Urban Climatology* (ICUC), die ihren Namen während der Sitzung 1996 in Essen erhielt.

Gerade in Zeiten des globalen Klimawandels hat die Grundlagen orientierte, insbesondere aber die angewandte Stadtklimaforschung eine nunmehr ungeahnte Bedeutung erlangt.

Literatur

AUER I., R. BÖHM & H. MOHNL (1989): Klima von Wien. Eine anwendungsorientierte Klimatographie.- Zentralanstalt für Meteorologie, Wien. 270 S.

BALCHIN W. G. V. & N. PYE (1947): A micro-climatological investigation of Bath and the surrounding district. Quarterl. Journ. Roy. Meteorolog. Soc. 73, 297-323.

BAUMÜLLER J. & U.REUTER (1996): Stadtklimatologische Aspekte am Beispiel von Stuttgart. - Geowissenschaften 14, H. 6, 229-232.

CHANGNON S. A. (ed.) (1981): METROMEX: A review and summary. Meterol. Monogr. Vol. 18, No. 40, 1-15, Am. Meteorol. Soc., Boston.

EVELYN J. (1661): Fumifugium: Or the inconvenience of the air and smoke of London dissipated. 43 pp. Oxford, England. Reprinted, National Smoke Abatement Society, Manchester 1933). Text of Fumifugium. Internet Archive. Retrieved 7 January 2010

HELBIG A., J. BAUMÜLLER & M. J. KERSCHENS (Hrsg.) (1999): Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. A.Springer, Berlin; 467 S.

HEINEBERG H. (2017): Stadtgeographie. 5. A., F. Schöningh Verlag, Paderborn; 504 S.

HOWARD L. (1833): Climate of London deduced from meteorological observations. 3rd ed.; in 3 Vols., Harvey & Darton, London.

HUPFER P. & F. M. CHMIELEWSKI (1990): Das Klima von Berlin. Akademie-Verlag, Berlin. 288 S.

JANKOVIC V. (2013): A historical review of urban climatology and the atmospheres of the industrialized world. -WIREs Clim Change. Doi: 10.1002/wcc.244.

JANKOVIC V. & M. HEBBERT (2012): Hidden climate change-urban meteorology and the scales of real weather.- Clim Change 113, 23-33.

JAUREGUI E. (1973): The urban climate of Mexico City. -Erdkunde, 27, 298-307.

JENDRITZKY G., W. SOENNING & H.-J. SWANTES (1979): Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung. -Beitrag ARL, Nr. 28.

KASSNER, C. (1910): Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaus. 3. Vortragszyklus; Städtebauliche Vorträge, Band III, Heft VI, 1-26.

KNAUSS D. (1901): Die Stuttgarter Stadterweiterung mit volkswirtschaftlichen hygienischen und künstlerischen Gutachten. - Stadtschultheissenamt Stuttgart, 14, Nr. 132.

KRATZER P. A. (1937 und 1956): Das Stadtklima. 1. A.: 143 S., 2. A.: 184 S., Vieweg, Braunschweig.

KUTTLER W. (1979 a): London-Smog und Los Angeles-Smog.- Erdkunde, 33, 3, 236-240.

KUTTLER W. (1979 b): Einflußgrößen gesundheitsgefährdender Wetterlagen und deren bioklimatische Auswirkungen auf potentielle Erholungsgebiete. - Bochumer Geogr. Arbeiten Nr. 36; F.Schöningh Paderborn, 101 S.

KUTTLER W. (2012): Climate change on the urban scale – effects and counter measures in Central Europe. – Climate Change/ Book 1; pp. 105-146; doi: dx.doi.org/10.5772/50867

KUTTLER W., A. MIETHKE, D. DÜTEMEYER & A.-B. BARLAG, A.-B. (2015): Das Klima von Essen/ The Climate of Essen. Westarp Wissenschaft. Hohenwarsleben. 249 S.

KUTTLER W. (2018): Rezension zu »Urban Climates« (Verfasser: Oke, Mills, Voogt, Christen). - Mitt DMG, 1/2018, 34-36.

LANDESHAUPTSTADT STUTTGART, AMT FÜR UMWELTSCHUTZ, Abt. Stadtklimatologie *https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?luft...*

LANDSBERG H. E. (1981): The Urban Climate. Academic Press. New York, 275 S.

LOWRY W. P. (1977): Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. J. Appl. Meteorol. 16, 129-135.

MARONGA B., G. GROSS, S. RAASCH et al. (2019): Development of a new urban climate model based on the model PALM - Project overview, planned work, and first achievements , Met. Z. DOI: 10.1127/metz/2019/0909.

MAYER H. & P. HÖPPE (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. - Theor. Appl. Climatol. 38, 43-49.

MAYER H. (1988): Results from the Research Program "STADTKLIMA BAYERN" for Urban Planning. - Energy and Buildings, Vol. 11, 115-121.

MORIYAMA M. & M. MATSUMOTO (1988): Control of urban night temperature in semi-tropical regions during summer.- Energy and Building, 11, 213-220.

NEUMANN J. (1979): Air pollution in Ancient Rome. - Bull. Am.Meteorol. Soc., 60, 1097.

OKE T. R. (1974): Review of urban climatology, 1968-1973. WMO-Publ., Techn. Note 134, 132 pp.

OKE T. R. (1979): Review of urban climatology. WMO-Publ. Techn. Note 169, 100 pp.

OKE T. R., G. MILLS, A. CHRISTEN & J. VOOGT (2017): Urban Climates. Cambridge University Press, UK, 525 pp.

OSTERHAMMEL J. (2011): Die Verwandlung der Welt. Eine Geschichte des 19. Jahrhunderts. 6. A., C. H. Beck, München; 1568 S.

PEPPLER A. (1929): Das Auto als Hilfsmittel der meteorlogischen Forschung.-Zeitschrift für angewandte Meteorologie, 48, 305-308.

RAASCH S. & M. SCHRÖTER (2001): PALM – A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers.- Met Zeit 10, 363-372.

REN C., N. G. E.Y. & L. KATZSCHNER (2011): Urban climatic map studies: a review - Int. J. Climatol. 31, 2213-2233.

ROTACH M. W., R. VOGT, C. BERNHOFER et al. (2005): Bubble - an urban boundary layer meteorology project. - Theor. Appl. Climatol. Vol. 81, 221-261.

SCHERER D., F. AMENT, S. EMEIS et al. (2019): Three-dimensional observation of atmospheric processes in cities.- Met Zeit 28, 121-138.

SCHIRMER H., W. KUTTLER, J. LÖBEL & K. WEBER (Hrsg.)(1993): Lufthygiene und Klima. VDI-Verlag, Düsseldorf. 507 S.

SHAM S. (1979): Aspects of air pollution climatology in a tropical city. Universiti Kebangsaan Malaysia Press, Bangi. 344 S.

SHAM S. (1990/91): Urban Climatology in Malaysia: An Overview. Energy and Buildings, 15-16, 105-117.

SMITH R. A. (1872): Air and Rain. The Beginnings of a chemical Climatology. Longmans, Green and Co, London. 600 S.

STEINHAUSER F., O. ECKEL & F. SAUBERER (1955, 1957, 1959): Klima und Bioklima von Wien. Teil I (123 S.), Teil II (136 S.), Teil III (136 S.). Verlag: Österr. Gesell. f. Meteorol., Wien XIX, Hohe Warte.

SUNDBORG A. (1950): Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area. - Tellus 2, 222-232.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure): Richtlinien 3785, 3787, 3789 mit zahlreichen Blättern zur Umweltmeteorologie. Beuth Verlag. Berlin.

VON FENSTERBUSCH C. (Hrsg.) (1996): De architectura libri decem (Autor: Vitruvius). Wiss. Buchgesell. Darmstadt, 585 S.

YOSHINO M. (1990/91): Development of urban climatology and problems today. Energy and Buildings,15-16, pp. 1-10.

Kontakt:
Prof. em. Dr. Wilhelm Kuttler
Angewandte Klimatologie
Universität Duisburg-Essen
wiku@uni-due.de

Kuttler W. (2019): Zur Geschichte der Stadtklimatologie. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 28-35. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.04.

1.3 Vertikale Gliederung der Stadtatmosphäre

ANDREAS CHRISTEN

Dieser Beitrag beschreibt die Grundlagen und Besonderheiten der vertikalen Gliederung der Atmosphäre über Städten. Strömt die Atmosphäre über eine Stadt, bildet sich bodennah eine städtische Grenzschicht aus, die etwa 1-2 km in die Höhe reicht und im Abwindbereich über zehn bis hundert Kilometer messbar ist. Die städtische Grenzschicht ist im Gegensatz zur atmosphärischen Grenzschicht im ländlichen Umland von der erhöhten Rauigkeit der Stadtoberfläche, dem generell erhöhten Wärmeeintrag der Stadt in die Atmosphäre, sowie den Emissionen von Luftbeimengungen aus städtischem Quellen geprägt. Die städtische Grenzschicht kann grundsätzlich in zwei Bereiche eingeteilt werden: Die obersten 90%, welche tagsüber durch Thermik charakterisiert sind (Mischungsschicht) und die unteren, bodennahen 10% wo intensive mechanische Turbulenz aus der Bodenreibung und der Rauigkeit auftritt (Prandtl-Schicht). Die Mischungsschicht zeigt einen ausgeprägten Tagesgang. Über einer Stadt hebt die intensivere, thermische Turbulenz in der Mischungsschicht tagsüber die darüberliegende Grenzschichtinversion um bis zu 20% gegenüber dem Umland an. Nachts bricht die Turbulenz in der verbleibenden Mischungsschicht (Restschicht) fast vollständig zusammen, wobei aufgrund der städtischen Wärmeinsel über dicht bebauten Städten anstatt einer üblichen Bodeninversion oft auch eine schwache, erhöhte Inversion in wenigen hundert Metern Höhe beobachtet werden kann. Die Prantl-Schicht darunter bleibt aufgrund der städtischen Wärmeinsel nachts oft instabil. Die Prandtl-Schicht wird weiter in eine Intertialschicht und eine raue Unterschicht unterteilt. Während in der Intertialschicht Eigenschaften der Stadtoberfläche so stark vermischt werden, dass die Strömung positionsunabhängig ist, bleibt die Strömung in der rauen Unterschicht von einzelnen Gebäuden und Bäumen abhängig und ist daher horizontal und vertikal sehr kleinräumig strukturiert. Innerhalb der rauen Unterschicht können wir noch die Stadthindernisschicht ausweisen. Die Stadthindernisschicht erstreckt sich vom Strassenniveau bis zur Höhe der höchsten Gebäude. In der Stadthindernisschicht sind Strömung und Temperaturverteilung in Strassenschluchten und Innenhöfen direkt von der dreidimensionalen, städtischen Geometrie bestimmt. Das Strahlungsfeld ist kleinräumig differenziert (Sonnen und Schattenbereich) und die Luftqualität ist auf der Skala von Metern von der Strömung und der Lage lokaler Emissionsquellen geprägt.

***Vertical structure of the atmosphere over cities:** This contribution describes the fundamentals and peculiarities of the vertical structure of the atmosphere over cities When atmospheric air masses encounter a city, an urban boundary layer (UBL) is formed near the surface, extending approximately up to a height of 1-2 km above ground and persisting downwind of the city as an urban plume over tens to hundreds of kilometres. In contrast to the atmospheric boundary layer in rural areas, the UBL reflects the increased roughness of the urban surface, the increased heat injections into the atmosphere, and the emissions of air pollutants from urban sources. The UBL can be divided in two 1 regions: The top 90%, characterised by thermals during the day (mixed layer) and the lowest 10% near the surface where mechanical turbulence dominates (surface layer). The mixed layer (ML) undergoes a distinct diurnal cycle. The intensified daytime turbulence in the ML over a city can lift the capping inversion over the city by up to 20% relative to the rural surrounding. At night, turbulence breaks down to a large extent in the remains of the ML (residual layer). However, instead of the usual nocturnal surface inversion, inner cities can develop an elevated inversion at a height of a few hundred meters, while the surface layer below may remain slightly unstable due to the urban heat island. The surface layer is further subdivided into an inertial sublayer (ISL) and a roughness sublayer (RSL). In the ISL, properties of the urban surface are mixed intensely so that air flow in the ISL is position-independent. In contrast, air flow in the RSL is horizontally dependent on the location relative to individual buildings and trees. As a lowest layer, we can define the urban canopy layer (UCL) within the RSL. The UCL consists of the outdoor air and the atmosphere in the interior of buildings, extending from street level to the height of the tallest buildings and trees. In the UCL, air flow and temperatures are very location specific with regard to the three-dimensional, urban geometry in street canyons and courtyards. The radiation field shows small-scale differentiation (suns and shadows) and mean air quality differs on the scale of a few meters by the location of local emission sources relative to the approaching flow.*

Die städtische Grenzschicht

Die atmosphärische Grenzschicht beschreibt die untersten 1-2 km der Troposphäre, in der generell ein Einfluss der Erdoberfläche zu spüren ist. Aufgrund der Reibung der Luft an der Erdoberfläche nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit in der atmosphärischen Grenzschicht zum Erdboden hin ab. Am Erdboden selbst kommt der Wind komplett zum Erliegen. Durch diese Windabnahme mit abnehmender Höhe bildet sich ein vertikaler Windgradient, der bodennah am stärksten ist. Infolge der zum Boden hin stärker werdenden Windgradienten wird die Strömung dynamisch instabil und es bilden sich Wirbel unterschiedlicher Größe. Diese zufälligen Wirbel beschreiben wir in ihrer Gesamtheit als Turbulenz. Die Turbulenz ist eine grundlegende Charakteristik der atmosphärischen Grenzschicht und wird als Böigkeit des Windes wahrgenommen.

Wird tagsüber der Erdboden durch die Sonne aufgeheizt, dann wird die bodennahe Luft erwärmt und es bildet sich Thermik - aufgrund der geringeren Dichte steigen warme Luftpakete lokal auf. Thermik führt in der atmosphärischen Grenzschicht zu zusätzlicher, weiterer Turbulenz. Thermische Turbulenz kann aufgrund des Auftriebs häufig höher reichen als die Tur-

bulenz, die durch Rauigkeit und das Windprofil nahe am Erdboden erzeugt wurde. Höher als 1-2 km reicht allerdings Thermik in der Grenzschicht meistens auch nicht, da die Troposphäre in ihrer Gesamtheit leicht stabil geschichtet ist und sich daher über der gut durchmischten Grenzschicht eine Grenzschichtinversion (engl. »*capping inversion*«) bildet. In der Grenzschichtinversion nimmt die Temperatur mit der Höhe zu, was den Austausch der Luft zwischen der Grenzschicht und der darüber liegenden freien Troposphäre verhindert. Eine Ausnahme bilden Gewitter und Frontalsysteme, welche sporadisch die Grenzschichtinversion durchbrechen und somit die Grenzschichtluft mit der Luft der gesamten Troposphäre mischen (Stull 2015).

Turbulenz in der atmosphärischen Grenzschicht ist durch den Reibungseinfluss sowie die Thermik tagsüber stark ausgeprägt, was die Luft innerhalb der Grenzschicht gut durchmischt. Durch die Turbulenz werden in der Grenzschicht Wärme, Wasserdampf, und Spurengase zwischen Boden und Atmosphäre effektiv gemischt.

Beim Auskühlen des Erdbodens in der Nacht wird die bodennahe Luft abgekühlt und verbleibt am Boden, da kältere Luft dichter ist. Die Temperatur ist nahe des Bodens am tiefsten und nimmt mit der Höhe zu. Es bildet sich also eine Inversion direkt am Boden. Der Bereich der Atmosphäre der nachts durch die Erdoberfläche beeinflusst wird, ist viel flacher (typischerweise nur 200 - 400 m). Diesen Bereich nennen wir die stabile Grenzschicht. In der stabilen Grenzschicht wird Turbulenz abgeschwächt, unter Umständen sogar unterbunden. Am Boden emittierte Luftverunreinigungen akkumulieren sich in der bodennahen, stabilen Grenzschicht und werden nicht vertikal gemischt, können aber in komplexer Orographie infolge von Kaltluftabflüssen seitlich wegtransportiert werden (siehe Kap. 1.5 Katschner & Kupski - in diesem Band). Dies ist ein Grund, warum im ländlichen Raum die Luftqualität nachts häufig schlechter ist, auch wenn die Emissionen aus Verkehr und Industrie geringer sind. Ebenfalls wird man nachts eher mit Geruchsbelästigungen zu rechnen haben - in der stabilen Grenzschicht bleiben die Stoffe nahe am Boden, häufig resultiert daraus eine sehr kleinräumige Differenzierung und zeitlich variable Belastung (Salmond & McKendry 2005).

Charakteristika der städtischen Grenzschicht

Diese grundlegenden Austauschprozesse gibt es auch über einer Stadt, nur sind hier die Stärke der Rauigkeitseffekte und der Tagesgang der thermischen Effekte gegenüber dem Umland verändert. Strömt die Luft der atmosphärischen Grenzschicht über eine Stadt, bildet sich innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht eine städtische Grenzschicht (engl. »*urban boundary layer*«) als sogenannte »interne Grenzschicht« aus (Foken 2015). Die städtische Grenzschicht ist die Folge der sowohl mechanischen wie auch den energetischen Eigenschaften der städtischen Oberfläche. Dabei wird die städtische Grenzschicht, im Gegensatz zum ländlichen Umland, durch die erhöhte Rauigkeit, den generell erhöhten fühlbaren Wärmefluss sowie die erhöhten Emissionen von Luftbeimengungen von der Stadt in die Atmosphäre charakterisiert (Kuttler 2004).

In der städtischen Grenzschicht finden wir mehr Turbulenz. Gleichzeitig ist aber die mittlere Windgeschwindigkeit abschwächt. Aufgrund der städtischen Wärmeinsel ist auch die gesamte städtische Grenzschicht oft wärmer, allerdings sind diese Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland am stärksten nahe des Erdbodens (Oke et a1. 2017). Durch die Stadt wird also nicht nur die Zusammensetzung, sondern auch die Dynamik und die Energetik der Grenzschicht verändert. Dies beeinflusst die Ausbreitung von Spu-

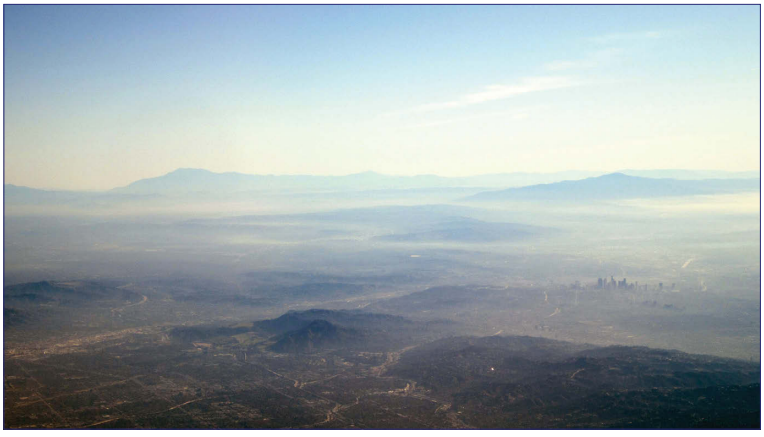


Abb. 1.3-1: *Die städtische Grenzschicht über der Region Los Angeles am frühen Morgen eines Wintertages. Die Schichtstruktur kommt gut zum Ausdruck - die horizontale Mischung der durch Feuchtigkeit und Luftverschmutzung deutlich getrübten Luft nahe der Stadt ist weitaus effektiver als die vertikale Mischung (Foto: A. Christen, CC-3.0).*

rengasen oder kann meteorologische Phänomene wie Winde, Wolkenbildung und im Extremfall sogar Gewitter verändern (Niyogi et al. 2011).

Die städtische Grenzschicht über einer großen Stadt kann für die weitere Betrachtung in zwei Bereiche eingeteilt werden: Die obersten 90% der städtischen Grenzschicht, in welchen thermische Turbulenz dominiert, werden als Mischungsschicht bezeichnet. Der Einfluss der mechanischen Turbulenz ist hier gering, da wir weit von der Erdoberfläche entfernt sind. Die unteren 10% nahe dem Erdboden werden als Prandtl-Schicht bezeichnet. In der Prandtl-Schicht gewinnt die mechanische Turbulenz infolge der Reibung an Bedeutung.

Räumliche Ausprägung der städtischen Grenzschicht

In einer autochthonen Wetterlage (Schwachwindlage, z.B. bei Hochdruck), kann die städtische Grenzschicht eine städtische Dunstglocke ausbilden (engl. »*urban dome*«, *Abb. 1.3-2a*). Die Mischungsschicht wird dann primär durch den Wärmeeintrag von der Stadt in die Atmosphäre thermisch beeinflusst. Die bodennahe Luft in der städtischen Grenzschicht erwärmt sich mehr als im Umland (städtische Wärmeinsel), der Luftdruck in der Stadt sinkt, die Luft steigt auf. Bodennah strömt Luft vom Umland in die Stadt, um die weggeführte Luft zu ersetzten. Diese Ausgleichswinde welche als »Flurwinde« (engl. »*country breeze*«) bezeichnet. In der Höhe von 1-2 km divergiert die Luft von der Stadt nach außen und sinkt ab. Es bildet sich eine geschlossene Windzirkulation, die sogenannte Wärmeinselzirkulation (engl. »*urban heat island circulation*«).

Bei höheren Windgeschwindigkeiten wird die von der Stadt beeinflusste Grenzschichtluft seitlich weggetransportiert (*Abb. 1.3-2b*). Es bildet sich im Abwindbereich einer Stadt eine neue, ländliche Grenzschicht. Die Reste der städtischen Grenzschicht verbleiben aber in der Höhe. Die Schicht städtisch modifizierter Luft ähnelt einer riesigen »Abluftfahne« aus einem Schornstein (der Stadt), daher wird diese Ausprägung der Grenzschicht auch im Englischen »urban plume« genannt (nach Clarke 1969). Die thermischen Effekte der »*urban plume*« großer Städte und Stadtagglomerationen ist bis zu zehn Kilometer, die Effekte der Luftschadstoffe über hunderte von Kilometern messbar (Oke et al. 2017).

Zeitliche Dynamik der städtischen Grenzschicht

In städtischen Gebieten mit hohen Emissionen von Luftschadstoffen ist das Grenzschichtvolumen (und damit die Mischungsschichthöhe z_i), in welchem Luftschadstoffe verdünnt werden, entscheidend für die Auswirkungen auf die Luftqualität. Die Grenzschicht reagiert auf den Austausch von Wärme und Masse an der Landoberfläche innerhalb kurzer Zeit (ca. 1 Stunde). Die Mischungsschichthöhe z_i ändert sich im Laufe des Tages und die Mischungsschicht weist einen ausgeprägten Tagesgang der Temperatur, Feuchte, der

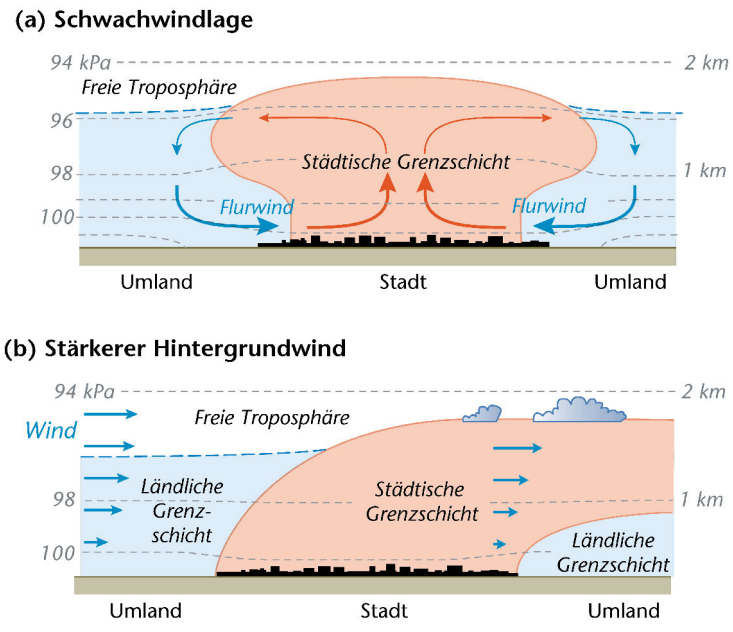


Abb. 1.3-2: *Schematische Darstellung von zwei typischen, räumlichen Ausprägungen der städtischen Grenzschicht. (a) Bei Schwachwind und intensiver Sonnenstrahlung wird sich eine städtische Dunstglocke »engl. urban dome« mit einer Wärmeinselzirkulation und bodennahen Flurwinden ausbilden. (b) Bei stärkerem Wind bildet sich eine städtische Abfluftfahne »engl. urban plume«, welche in der Höhe die Eigenschaften der Stadtatmosphäre weit über den bebauten Bereich der Stadt hinaus verfrachtet.*

Konzentration von Stoffen, des Windes und der Turbulenzintensität auf.

Die tagsüber mächtige, städtische Mischungsschicht weist eine starke, vertikale Durchmischung auf, die aufgrund des verstärkten fühlbaren Wärmestroms der Stadtoberfläche intensiver ist als im ländlichen Umfeld. Als Folge davon kann die Mischungsschichthöhe zi tagsüber über Städten bis zu 20% höher als im Umland liegen (*Abb. 1.3-3*).

Nachts bricht die Turbulenz in der verbleibenden Mischungsschicht (Restschicht) fast völlig zusammen, wobei aufgrund der städtischen Wärmeinsel über dicht bebauten Städten anstatt der üblichen nächtlichen Bodeninversion oft eine schwache, erhöhte Temperaturinversion auf wenigen hundert Metern Höhe beobachtet werden kann (*Abb. 1.3-3b*). Bornstein (1968) fand für New York, dass erhöhte Inversionen in der Stadt häufiger vorkamen als Bodeninversion, in Gegensatz zu ländlichen Gebieten, wo Bodeninversionen dominierten. Die Basis der Inversion lag im Durchschnitt nahe 300 m Höhe. Unter den Temperaturinversionen verblieb ebenfalls eine neutrale bis leicht instabile Luftschicht. Christen & Vogt (2004) zeigten für die Stadt Basel, dass im Jahresmittel die bodennahe, nächtliche Atmosphäre im Stadtzentrum nur in 6% der Fälle stabil geschichtet war, während gleichzeitig im Umland in 75% der Fälle eine bodennahe, stabile Schichtung beobachtet wurde. In 72% der Fälle transportierte der fühlbare Wärmestrom auch nachts Wärme von der Stadt weg in die Atmosphäre (im Umland nur in 12% der Fälle).

Die Prandtl-Schicht über einer Stadt

In der Prandtl-Schicht (auch »Bodenschicht«, engl. »*surface layer*«, SL) werden die Eigenschaften der Strömung stark von der Distanz zur lokalen Oberfläche beeinflusst. Die Strömung ist überwiegend durch die Oberflächenrauhigkeit geprägt. Die Prandtl-Schicht über einer rauen Oberfläche wie einer Stadt wird weiter in zwei Unterschichten unterteilt: die Inertialschicht (engl. »*inertial sublayer*«, ISL) und die raue Unterschicht (engl. »*roughness sublayer*«, RSL).

Inertialschicht

Bei einer großflächigen, einheitlichen Stadtbebauung bildet sich eine gut gemischte und homogene Strömung ab etwa 2 bis 5 mal der Höhe der einzelnen Rauigkeitselemente (Gebäude, Bäume) aus. In dieser Intertialschicht sind die Eigenschaften eine integrale Antwort auf die Stadtoberfläche und der Einfluss einzelner Rauigkeitselemente ist nicht identifizierbar. Ebenfalls ist die Änderung der turbulenten Flüsse von fühlbarer Wärme mit der Höhe so gering, dass man diese als konstant annehmen kann. Dass hilft uns, Prozesse in der Inertialschicht zu vereinfachen und die Inertialschicht eindimensional zu beschreiben -Zustände sind horizontal invariabel und ändern sich nur noch mit der Höhe. Ein bekanntes Beispiel ist die logarithmische Zunahme des mittleren Windes mit der Höhe (logarithmisches Windprofil). Mit dem logarithmischen Windprofil lässt sich die Strömung mittels weniger Variablen, darunter die Rauigkeitslänge und die Nullpunktverschiebung der Stadtoberfläche beschreiben (Grimmond et al. 1998).

Rotach (1999) weist darauf hin, dass über einer Stadt eine Intertialschicht nicht zwingend vorhanden sein muss, sondern dass dies eher die Ausnahme ist. Einerseits, wenn die Gebäude der Stadt sehr hoch sind, andererseits wenn die städtische Struktur nicht horizontal genügend große, einheitlich bebaute Gebiete aufweist, ist es unmöglich, dass die Strömung in der Höhe überhaupt sich auf die Stadtunterlage einstellt. Daher ist auch der Einsatz von einfachen Ausbreitungsmodellen in Städten problematisch.

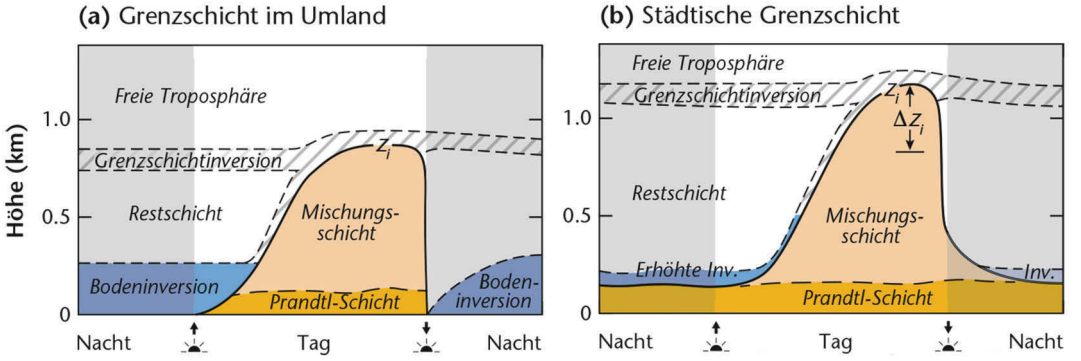


Abb. 1.3-3: *Idealisierter Tagesgang der Grenzschicht im (a) Umland einer Stadt und (b) über einer Stadt. Die Höhe der Mischungsschicht z_i über der Stadt ist tagsüber um Δz_i höher. Nachts ist über der Stadt anstatt einer Bodeninversion eine erhöhte Inversion zu finden (modifiziert nach Oke et al. 2017).*

Die raue Unterschicht

Der oberflächennahe Bereich, in welchem die Strömung von einzelnen Rauigkeitselementen (Gebäuden, Bäumen, Fahrzeugen, etc.) direkt beeinflusst wird, nennen wir die raue Unterschicht (Foken 2016). Die Dimensionen, Materialien und die Anordnung von Rauigkeitselementen, aus denen sich eine Stadt zusammensetzt, sind außerordentlich divers. Innerhalb der rauen Unterschicht kann daher die Strömung nur noch dreidimensional beschrieben werden und hängt direkt von der Lage, der Größe und der Form einzelner Rauigkeitselemente ab. Die Rauigkeitselemente verursachen im Mittel Regionen erhöhter und abgeschwächter Windgeschwindigkeiten. Generell weist die raue Unterschicht eine hohe Böigkeit auf. Starke horizontale und vertikale Gradienten von Wind, Turbulenz, Temperatur und Luftbeimengungen sind die Regel.

Die raue Unterschicht ist in einer Stadt immer vorhanden. Die raue Unterschicht reicht vom Erdboden bis etwa 2 bis 5 mal die Höhe der höchsten Rauigkeitselemente. Der Übergang zwischen rauer Unterschicht und Inertialschicht (wenn vorhanden) wird »*blending height*« z_r bezeichnet, wobei es sich nicht um eine klare Grenze handelt, sondern die Strömung verändert sich allmählich von der Beeinflussung durch einzelne Rauhigkeitselemente (raue Unterschicht) zu einer von der horizontalen Position und einzelnen Rauigkeitselementen unabhängigen Strömung (Inertialschicht).

Die Stadthindernisschicht

Innerhalb der rauen Unterschicht können wir weiter noch die Stadthindernisschicht (engl. »*urban canopy layer*«, UCL) ausweisen. Sie besteht aus der Außenluft zwischen den Gebäuden und Bäumen und der Innenraumluft in den Gebäuden und Fahrzeugen. Die Stadthindernisschicht erstreckt sich vom Straßenniveau bis zur mittleren Höhe der Gebäude und Bäume.

Die Stadthindernisschicht hat eine äußerst große Bedeutung, denn dies ist derjenige Teil der Atmosphäre, in der mehr als die Hälfte der Menschheit lebt – in Deutschland sogar drei Viertel. Zustand und Prozesse der Atmosphäre in der Stadthindernisschicht werden oft dem »Stadtklima« gleichgesetzt. Das ist nicht korrekt, denn das Stadtklima wirkt sich auf die gesamte atmosphärische Grenzschicht und auch weit über die bebaute Fläche von Städten hinaus aus (*Abb. 1.3-2*), dennoch sind die stärksten Veränderungen in der Stadthindernisschicht zu finden. In der Stadthindernisschicht wird die Strömung fast ausschließlich von Geometrie in Bezug auf die Anströmrichtung beeinflusst. Das Strahlungsfeld (solar und thermales Infrarot) ist kleinräumig differenziert. Die Temperatur in der Stadthindernisschicht ist stark geprägt der Verteilung des Sonnenlichtes auf der dreidimensionalen städtischen Oberfläche. Und die Luftqualität ist von der Strömung und der Lage zu Emissionsquellen (Fahrzeuge, Kamine) geprägt.

Als weitere Komplexität kommt hinzu, dass Menschen nicht an einem Ort verankert sind, sondern sich durch die Stadthindernisschicht bewegen, Innenräume und Außenräume wechseln und damit verschiedenste Mikroklimate durchqueren. Es bleibt eine Herausforderung, die raumzeitliche Variabilität der Stadthindernisschicht mit der Komplexität der menschlichen Aktivitäten zu kombinieren, um das Klima, welches Menschen in Städten erfahren, sinnvoll zu beschreiben und vorherzusagen. Als ein Kompromiss zwischen Realität und Generalisierung wird die Stadthindernisschicht oft mit vereinfachten Geometrien beschrieben.

Besondere Aufmerksamkeit hat die Atmosphäre und deren Eigenschaften in idealisierten Straßenschluchten erhalten. Straßenschluchten sind Straßenzüge die beidseitig von gleich hohen Gebäuden begrenzt sind. Die Geometrie einer Straßenschlucht kann mit dem Verhältnis der Gebäudehöhe H zur Breite der Straße W beschrieben werden. *Abb. 1.3-4* zeigt exemplarisch die Strömungsmuster die sich im Mittel in einer Straßenschlucht mit $H/W = 1$ ausbilden. Mit einer übergeordneten Strömung rechtwinklig zur Straße bildet sich in einer Straßenschlucht im Mittel eine stehende Zirkulation aus. Die Luft in der Straßenschlucht rotiert mit einer Rotationsachse entlang der Straße. Die mitt-

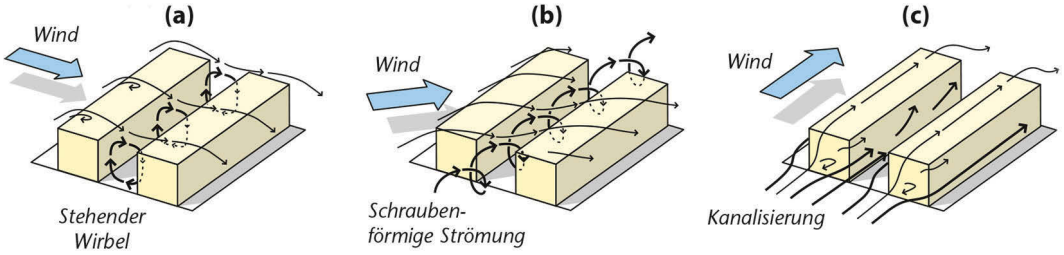


Abb. 1.3-4: *Schematische Muster der mittleren Strömung in einer Straßenschlucht mit H/W=1 (modifiziert nach Oke et al. 2017).*

lere Windgeschwindigkeit ist eher gering. Eine solche Situation erweist sich als ungünstig für die Belüftung der Straße. Emissionen aus dem Kraftfahrzeugverkehr verbleiben länger in der Straßenschlucht. Schadstoffe werden zwar herumgewirbelt, aber nur schlecht mit der Strömung über den Dächern gemischt. Ist die übergeordnete Windrichtung schräg zur Straßenschlucht (*Abb. 1.3-4b*), dann bildet sich ebenfalls ein Wirbel aus, allerdings »schraubt sich« die Luft entlang der Straßenschlucht und wird an der nächsten Kreuzung eher vermischt. In *Abb. 1.3-4c* ist die übergeordnete Windrichtung parallel zur Achse der Straßenschlucht. Hier wird die Strömung ggf. sogar beschleunigt und die mittlere Windgeschwindigkeit am Boden nimmt deutlich zu. Schadstoffe werden rascher verdünnt.

Komplexere Situationen des Klimas innerhalb der Stadthindernisschicht, insbesondere zur Beurteilung von verschiedenen Stadtplanungsszenarien, sind nur mittels gebäudeauflösender Modellsimulationen zu beschreiben und zu berechnen. Dazu gehören gebäudeauflösende Large Eddy Simulationen des Windfeldes und der Turbulenz (z.B. Giometto et al. 2017), gebäudeauflösende Modelle der Energiebilanz des Menschen für die Humanbiometeorologie in der Stadt (z.B. Fröhlich & Matzarakis 2019) oder gebäudeauflösende Modelle des Mikro- und Gebäudeklimas (z.B. Yang et al. 2012). Diese Modelle sind aber zu komplex und rechenintensiv, damit sie in der Wettervorhersage, in der Luftqualitätsvorhersage oder in Klimaprojektionen Verwendung finden würden. Anstatt dessen nutzt man sehr vereinfache Parametrisierungen der Stadthindernisschicht, sogenannte »*urban canopy models*«, welche Austauschprozesse und Klima der Stadthindernisschicht exemplarisch mit sehr vereinfachter Geometrie berechnen und mit regionalen und globalen Modellen gekoppelt sind (Grimmond et al. 2010).

Schlussfolgerungen

Tab. 1.3-1 fasst die vertikalen Schichten der Stadtatmosphäre und ihre Eigenschaften zusammen. Wir können die vertikale Struktur der Atmosphäre über einer Stadt als eine hierarchische Antwort auf die horizontalen Skalen der städtischen Form interpretieren. Die Strömung in der **Stadthindernisschicht** zum Beispiel ist von einzelnen Gebäudeteilen und Dimensionen wie Straßenbreiten und Wandhöhen beeinflusst. Die **raue Unterschicht** wird durch einzelne Gebäude und Gebäudegruppen geprägt. Die **Inertialschicht** hingegen stellt die übergeordnete Antwort auf die Rauigkeit eines ganzen Stadtteils, bestehend aus tausenden Gebäuden, dar. Die **Mischungsschicht** reagiert auf die Änderungen zwischen Umland und Stadt auf der Ska-

Tab. 1.3-1: *Die Schichten der Stadtatmosphäre, deren Definitionen und Höhenbereiche.*

Vertikale Schichten				Definition	Typischer Höhenbereich	Dominierende räumliche Skala
Freie Troposphäre				Bereich der Troposphäre in welchem kein direkter Einfluss der (städtischen) Landoberfläche vorhanden ist.	Ab ca. 1 km bis 10-15 km	
Städtische Grenzschicht	Mischungs-schicht			Schicht in der die thermischen und stofflichen Eigenschaften der Stadt gut durchmischt sind. Thermische Turbulenz dominiert. Wird nach oben durch die Grenzschichtinversion begrenzt. Nur tagsüber als aktive, turbulente Schicht vorhanden. Nachts: verbleibend als "Restschicht".	Vom Boden bis zur Höhe der Grenzschicht-inversion (Mischungsschicht-höhe z_i, typischerweise 1 bis maximal 2,5 km)	Gesamte Stadt
	Prandtl-Schicht	Inertialschicht		Die untersten 10% der städtischen Grenzschicht, in der die Strömung vor allem durch mechanische Turbulenz geprägt ist.	Vom der "blending height" z_r bis ca. 100 m.	Stadtteil, Quartier
		Raue Unterschicht		Die bodennahe Atmosphäre in der die Strömung von einzelnen Rauigkeitselementen (Gebäuden, Bäumen, etc.) abhängig ist. Schließt die Stadthindernisschicht mit ein.	Vom Boden bis zur "blending height" z_r (2 bis 5-facher Gebäudehöhe)	Einzelne Gebäude und Gebäudegruppen
			Stadt-hindernis-schicht	Die Atmosphäre zwischen und innerhalb von Gebäuden.	Vom Boden bis zur typischen Gebäudehöhe z_H	Gebäude-dimensionen (Wandhöhe, Straßenbreite)

la einer ganzen Stadt mit vielen Stadtteilen. Es bleibt festzuhalten, dass die Einteilung der Stadtatmosphäre in Schichten davon motiviert ist, dass in jeder Schicht eigene, oft vereinfachte Ansätze, Parametrisierungen und Modelle eingesetzt werden, die oft nur in dieser Skala bzw. Schicht Gültigkeit finden. Es ist aber auch die Aufgabe laufender Stadtklimaforschung, die atmosphärischen Prozesse, die auf der Ebene von einzelnen Menschen, Straßenschluchten, Stadtteilen, Städten und Regionen stattfinden, besser zu verknüpfen und in Modellen abzubilden (Barlow et al. 2017). Bisher hat die Stadtklimatologie traditionell mit einem Ansatz der Abstraktion technische Ansätze auf bestimmten Skalen geschaffen, aber nur wenige Beobachtungs- und Modellsysteme sind in der Lage, die verschiedenen Skalen, und damit Schichten der Atmosphäre mit dem menschlichen Handeln in der Stadt zu verknüpfen. Eine Verknüpfung dieser Skalen und Prozesse ist aber für die Entwicklung zukünftiger Modellsysteme des Stadtklimas, und damit eine Abschätzung des Klimas der Städte im Kontext von Urbanisierung, Transformation und Klimawandel von entscheidender Bedeutung.

Literatur

BARLOW J., B. J. BEST, S. I. BOHNENSTENGEL et al. (2017): Developing a Research Strategy to Better Understand, Observe, and Simulate Urban Atmospheric Processes at Kilometer to Subkilometer Scales. Bull. Americ Meteorol. Soc., 98, ES261-ES264 10.1175/BAMS-D-17-0106.1.

BORNSTEIN R. D. (1968): Observation of the Urban Heat Island Effect in New York City", J. Appl. Meteorol. 7, 572-582.

CHRISTEN A. & R. VOGT (2004): Energy and radiation balance of a central European city. Int. J. Climatol. 24, 1395-1421.

CLARKE J. R. (1969): The nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio. Monthly Weather Rev., 97, 582-589.

FOKEN T. (2016): Angewandte Meteorologie - Mikrometeorologische Methoden. Springer, Spektrum. ISBN 978-36-422-5524-3.

FRÖHLICH D. & A. MATZARAKIS (2019): Spatial Estimation of Thermal Indices in Urban Areas - Basics of the SkyHelios Model. Atmosphere, 9, 209, 1-14.

GIOMETTO M. G., A. CHRISTEN, C. MENEVEAU et al. (2016): Spatial Characteristics of Roughness Sublayer Mean Flow and Turbulence Over a Realistic Urban Surface. Bound-Layer Meteorol. 160, 425-452 (2016).

GRIMMOND C. S. B., T. KING, M. ROTH & T. R. OKE (1998): Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations. Bound-Layer Meteorol. 89, 1-24 (1998).

GRIMMOND C. S. B., M. BLACKETT, M. J. BEST et al. (2010): The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First results from Phase 1. J. Appl. Meteorol. Climatol., 49, 1268-1292.

KUTTLER W. (2004): Stadtklima - Teil 2: Phänomene und Wirkungen. UWSF - Z. Umweltchem Ökotox. 16 (3), 263-274.

NIYOGI D., P. PYLE, M. LEI et al. (2011): Urban Modification of Thunderstorms: An Observational Storm Climatology and Model Case Study for the Indianapolis Urban Region. J. Appl. Meteorol. Climatol. 50, 1129-1144.

OKE T. R., G. MILLS, A. CHRISTEN & J. A.VOOGT (2017): Urban Climates, Cambridge University Press, ISBN 978-11-074-2953-6.

ROTACH M. W. (1999): On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion". Atmos. Environ. 33, 401-408.

SALMOND J. & I. G. MCKENDRY (2005): A review of turbulence in the very stable nocturnal boundary layer and its implications for air quality. Prog. Phys. Geogr. 29, (2), 171-188.

STULL R. B. (2015): Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science, 938 pp. Free online under a Creative Commons license. ISBN 978-0-88865-176-1.

YANG X., L. ZHAO, M. BRUSE & Q. MENG (2012): An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. Energ. Buildings 54, 243-251.

Kontakt

Prof. Dr. Andreas Christen
Umweltmeteorologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
andreas.christen@meteo.uni-freiburg.de

Christen A. (2019): Vertikale Gliederung der Stadtatmosphäre. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 36-42. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.05.

1.4 Variabilität von meteorologischen Parametern in Städten

Andreas Matzarakis & Andreas Christen

In diesem Beitrag wird die Differenzierung des Mikroklimas innerhalb von bebauten Flächen, also innerhalb von Straßenschluchten, Plätzen wie auch lokal-klimatische Unterschiede zwischen einzelnen Stadtteilen, Parks und städtischen Wasserflächen herausgearbeitet. Die Unterschiede in der Strahlung, der Lufttemperatur und -feuchte, der thermischen Belastung und der Luftschadstoffbelastung werden mit der Energiebilanz, der Wasserbilanz und der Stärke von und der Nähe zu Emissionsquellen erklärt. In der Anwendung ist es oft nicht möglich, die Temperatur, die Feuchte oder die Luftqualität direkt in der Luft zu ändern. Anstatt dessen müssen die bestimmende Energiebilanz der Stadtoberfläche, die Wasserbilanz und die Emissionen in eine Richtung modifiziert werden, dass vorhandene, natürliche Ressourcen effizient genutzt, die Belastungen der Bevölkerung bei Extremwetterlagen reduziert und die Bevölkerung vor atmosphärischen Naturgefahren geschützt wird.

***Variability of meteorological parameters within cities:** This contribution discusses the differential microclimates within built-up areas, i.e. within street canyons, city squares but also local-scale differences between urban districts, parks and urban water bodies. The differences in radiation, air temperature and humidity, thermal stress and air pollution exposure are explained by the energy balance, the water balance and the strength of and proximity to emissions. Instead of directly modifying temperature, humidity or air quality, sustainable urban planning and architecture must modify the underlying energy balance of the urban surface, water balance and control emissions in a way that existing, natural resources are used efficiently, the stress on the population in extreme weather conditions is reduced and populations are protected against atmospheric hazards in cities.*

Innerstädtische Differenzierung des Stadtklimas

Um die zeitlichen und räumlichen Ausprägungen des Stadtklimas zu verstehen, müssen die Prozesse der Stadtoberfläche mit der Dynamik der Atmosphäre verknüpft werden. Temperaturunterschiede können mit dem unterschiedlichen Strahlungs- und Energieaustausch zwischen städtischen Oberflächen und der Atmosphäre erklärt werden (Oke et al. 2017). Unterschiede in der Feuchte benötigen zusätzlich ein Verständnis der hydrologischen Verhältnisse in der Stadt (Mayer et al. 2003). Die Unterschiede in Luftbeimengungen sind auf die Prozesse der Emissionen, Ausbreitung und der Deposition, in gewissen Fällen auch luftchemische Reaktionen zurückzuführen.

In Kap. 1.1 Kuttler (in diesem Band) wurden die entsprechenden Grundlagen der Strahlungsbilanz (*Tab. 1.1-2*), der Energiebilanz (*Tab. 1.1-3*) sowie der Stadthydrologie für die Ausbildung eines »Stadtklimas« im Vergleich zum Umland der Stadt herausgearbeitet. In diesem Kap. soll nun die weitere Differenzierung des Klimas innerhalb von bebauten Flächen beleuchtet werden. Es werden die Grundlagen der mikroskaligen Unterschiede der Klimaelemente Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftzusammensetzung innerhalb von Straßenschluchten, einzelnen Stadtteilen, aber auch Parks und städtischer Wasserflächen herausarbeiten und die entsprechenden Steuergrößen, die das Bioklima des Menschen beeinflussen, identifiziert. Das Windfeld in Städten wurde im vorangehenden Kapitel schon beleuchtet und wird hier nicht mehr besprochen (Kap. 1.3 Christen - in diesem Band).

Durch eine geschickte Wahl von Materialien, Geometrie (Dimensionen und Anordnung von Straßen, Gebäuden, Bäumen etc.), den Einsatz von Wasser, sowie die Kontrolle von Emissionen von Wärme, Wasser und Luftbeimengungen kann das Stadtklima, auch innerhalb von Städten, bedeutend modifiziert werden. Eine

***Tab. 1.4-1:** Gemessene Strahlungsflüsse an einem wolkenlosen Sommertag (23.6.2002) und einem wolkenlosen Wintertag (1.1.2002) über den Dächern und im Zentrum einer darunterliegenden Straßenschlucht in Basel, Schweiz. Gezeigt sind Tagessummen in MJ/(m² d) (Datenquelle: Station Basel-Sperrstrasse, BUBBLE, Rotach et al. 2005). Zur Definition der Strahlungsflüsse siehe Tab. 1.1-2 (Kap.1.1 Kuttler - in diesem Band).*

		Sonnenstrahlung			Thermische Infrarotstrahlung			
		Kurzwellige Einstrahlung $K\downarrow$	Kurzwellige Reflexion $K\uparrow$	Kurzwellige Strahlungsbilanz $K^* = K\downarrow - K\uparrow$	Langwellige Gegenstrahlung $L\downarrow$	Langwellige Ausstrahlung $L\uparrow$	Langwellige Strahlungsbilanz $L^* = L\downarrow - L\uparrow$	Strahlungsbilanz $Q^* = K^* + L^*$
23. Juni	Über den Dächern	28.3	3	25.4	32.3	41.1	-8.8	16.5
	Straßenschlucht	24.2	2.8	21.3	36.3	42.8	-6.5	14.9
1. Januar	Über den Dächern	6.4	1.4	5.1	17.5	25.5	-8	-2.9
	Straßenschlucht	0.7	0.1	0.6	21.7	26.4	-4.7	-4.2

wichtige Motivation für das Studium und das Verstehen des Stadtklimas besteht darin, dieses Wissen entweder für die Planung neuer Städte und Stadtteile zu verwenden oder klimatische Probleme in bestehenden Siedlungen anzugehen. Damit wird durch eine intelligente Steuerung der Prozessgrößen im Stadtklima der Grundsatz einer nachhaltigeren Stadtplanung und Architektur ermöglicht (Kap. 1.6 - von Lojewski und Kap. 6.10 Lee & Mayer - in diesem Band). Abgesehen von kontrollierten Experimenten kann das Zusammenwirken der Stadtoberfläche mit der Atmosphäre nur in komplexen numerischen Modellen abgebildet werden. Solche Modelle haben den Vorteil, dass die Klimawirkung zukünftiger Planungsmaßnahmen und Bauvorhaben vor deren Umsetzung simuliert werden kann (VDI 2008).

Kleinräumige Differenzierung der Strahlung

Die Sonneneinstrahlung ist der bedeutendste Energieeintrag, der das Klima in Bodennähe bestimmt. In Städten ist das Verständnis der Strahlung wichtig, um die komplexe Ausprägung von Mikroklimaten zu erklären. Einerseits gibt es eine Vielfalt städtischer Materialien, die jeweils unterschiedliche Strahlungseigenschaften aufweisen. Durch die dreidimensionale Struktur einer Stadt wird zudem der Austausch von Strahlung nicht nur zwischen Boden und Atmosphäre, sondern auch zwischen Strukturen (Straßen, Wänden, Bäumen, Dächern) ermöglicht bzw. durch Strukturen abgeblockt. Dies führt auf kleinster Skala zu einer scharfen Differenzierung zwischen Sonne und Schatten. Energie wird also durch Strahlung sowohl horizontal wie auch vertikal ungleichmäßig verteilt. Weniger offensichtlich aber gleichermaßen relevant, ist die langwellige Strahlung (Wärmestrahlung), die Energie zwischen Wänden, Straßen, Dächern und der Atmosphäre tagsüber und nachts austauscht. Zum Beispiel führt die eingeschränkte Himmelssicht in engen Straßenschluchten nachts dazu, dass der nächtliche Strahlungsverlust deutlich geringer ist als auf Freiflächen.

Um den Effekt der Geometrie zu illustrieren zeigt *Tab. 1.4-1* Strahlungsflüsse an zwei wolkenlosen Tagen, einmal gemessen über der Stadt mit uneingeschränkter Himmelssicht (Höhe 31,5 m, doppelte Gebäudehöhe) und gleichzeitig unten in einer Straßenschlucht auf 3,2 m Höhe. Die W-O orientierte Straßenschlucht hat ein Höhen (*H*) zu Breiten (*W*) Verhältnis von etwa 1. Durch zeitweise Abschattung ist der Eintrag an kurzwelliger Einstrahlung ($K\downarrow$) in der Straßenschlucht reduziert. Bei hochstehender Sonne im Sommer erreichen 85% der Strahlung die Straße. Im Winter ist die Straße den ganzen Tag im Schatten und nur 11% der Sonnenstrahlung kommen bis nach unten in Form von diffuser Strahlung. Der Anteil der kurwelligen Strahlung, die reflektiert wird, ist im Winter (Schnee) etwas höher. Der kurzwellige Gewinn (K^*) an der Basis der Straßenschlucht ist an beiden Tagen deutlich reduziert. Bei der langwelligen Strahlung zeigt sich das umgekehrte Bild: Die Straßenschlucht verliert weniger Energie, da die langwellige Gegenstrahlung ($L\downarrow$) in der Straßenschlucht nicht nur die Wärmestrahlung des Himmels sondern auch die Abstrahlung der wärmeren Gebäudewände entlang der Straße mit einbezieht. Die nach oben gerichtete langwellige Ausstrahlung ($L\uparrow$) ist in der Straßenschlucht etwas höher, da die Oberflächentemperatur der Straße höher ist. Über die 24 Stunden ist die kurzwellige Strahlung dominierend - An beiden Tagen erreicht weniger Strahlungsenergie (Q^*) die Basis der Straßenschlucht. Wichtig ist auch, dass nachts die Straßenschlucht infolge einer weniger negativen

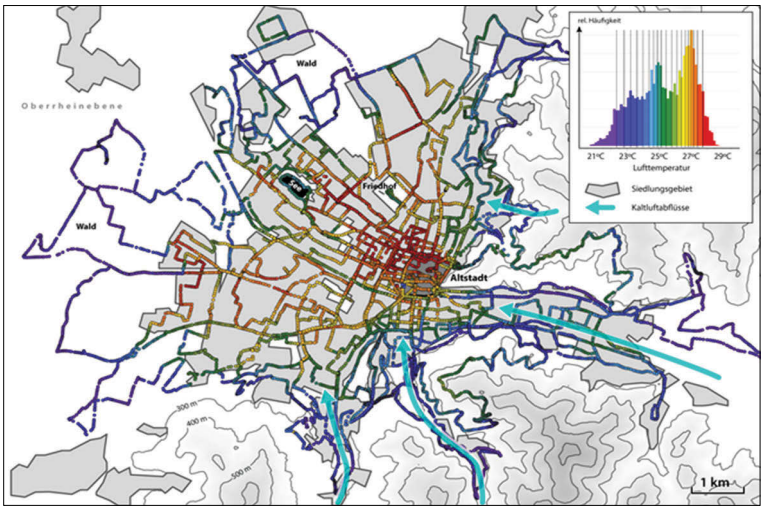


Abb. 1.4-1: *Kleinräumige Differenzierung der bodennahen Lufttemperatur in der Stadt Freiburg im Breisgau während der Hitzewelle vom 26.6.2019 um 22:00 Lokalzeit. Mit 25 mobilen Thermometern auf Fahrrädern wurde gleichzeitig die Lufttemperatur innerhalb und außerhalb der Stadt aufgezeichnet. Die Grafik zeigt die momentanen Temperaturen entlang der 25 Routen in Farbe (blau = kühl, rot = warm).*

Strahlungsbilanz weniger Energie verliert. Im Winter ist zum Beispiel die nächtliche Strahlungsbilanz Q^* in der Straßenschlucht -54 W/m², über der Stadt ist der Verlust -88 W/m².

Durch den geringeren nächtlichen Strahlungsverlust und durch die zugeführte in der Wärme der Materialien gespeicherte Energie (Q_S) kühlt die Luft abends in Strassenschluchten weniger rasch aus – ein Grund für die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel. Für Straßenbäume gilt, dass sie tagsüber die Sonnenstrahlung noch mehr reduzieren und es unter den Bäumen im langwelligen Bereich zu einer noch geringeren Abstrahlung kommen kann. Aufgrund der Strahlung können sich die Erwärmungs- und Auskühlungsraten innerhalb weniger Meter deutlich unterscheiden.

Kleinräumige Differenzierung der Lufttemperatur und Luftfeuchte

Die Wärmeinsel differenziert nicht nur Stadt und Umland, auch innerhalb von Stadtgebieten finden sich deutliche Temperaturunterschiede, die sich mit der Bebauungsdichte, dem Anteil an Grünflächen und Bäumen, der Lage zum Wind / Stadtrand sowie der Lage bezüglich wichtiger Kaltluftabflussbahnen erklären lassen. In *Abb. 1.4-1* ist die räumliche Verteilung der bodennahen Lufttemperatur in und um die Stadt Freiburg im Breisgau am späten Abend während einer Hitzewelle dargestellt. Tagsüber erreichten die Lufttemperaturen bei wolkenlosem Himmel in der Stadt Werte bis 32,7 ºC. Die Daten der Karte wurden mit mobilen Thermometern auf 25 Fahrrädern aufgezeichnet, die gleichzeitig durch das ganze Stadtgebiet gefahren wurden. Die Abkühlung während der etwa einstündigen Fahrt wurde auf den Zeitpunkt 22:00 korrigiert.

Ganz deutlich stechen die höchsten Temperaturen in der Altstadt und den nördlich und westlich davon angrenzenden, verdichteten Stadtteilen hervor. Hier erreicht die städtische Wärmeinsel ihr Maximum, die abendliche Auskühlung wird in den engen Straßenschluchten durch Freisetzung tagsüber gespeicherter Energie, der weniger negativen Strahlungbilanz und ggf. durch die Freisetzung anthropogener Wärme am meisten verzögert. Gegen Westen, wo die Orographie zur Oberrheinebene flach ist, finden wir auf einer horizontalen Distanz von 5 km Temperaturunterschiede bis 8 ºC. Die Temperaturen entlang bebauter Hanglagen im Osten und Süden der Stadt sind deutlich tiefer als vergleichbar bebaute Gebiete im ebenen Westen der Stadt. Hier führen Kaltluftabflüsse und Bergwinde entlang der Talachsen kältere Luft in das Stadtgebiet (blaue Pfeile). Diese Differenzierung der innerstädtischen Temperaturen ist kein Schönwetterphänomen, auch wenn die Ausprägung bei windschwachem Strahlungswetter am markantesten ausgeprägt ist, finden sich solche Stadteffekte zu allen Jahreszeiten (Matzarakis 2001, Matzarakis 2018).

Das Klima städtischer Grünflächen

In verdichteten Städten, die einen geringen Vegetationsanteil aufweisen, werden größere Grünflächen oft als klimatische »Oasen« wahrgenommen. Parks, in denen ausreichend Bodenwasser verfügbar ist, haben sowohl tagsüber wie auch nachts geringere Oberflächen- und Lufttemperaturen als ähnlich exponierte Beton- oder Asphaltflächen, auch wenn die Gründe je nach Tageszeit unterschiedlich sind (Spronken-Smith & Oke 1998). Tagsüber wird in Parkflächen ein Teil der eintreffenden, verfügbaren Energie (Q^*) für die Verdunstung genutzt (Q_E) womit dann weniger Energie für die Erwärmung der Oberfläche (Q_S) und der Luft (Q_H) zur Verfügung steht. Bäume spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Schaffung eines kühleren Parkklimas, da diese neben der Verdunstung auch Schatten spenden. Aber auch nachts erscheinen Parks als kühlere Depressionen innerhalb der städtischen Wärmeinsel. Während in den dicht bebauten Stadtteilen tagsüber Energie in Straßen und Wänden gespeichert wird und dann nachts bei der Abgabe der Wärme die Luft weniger rasch auskühlen lässt, ist die Speicherung von Energie in Parkanlagen auf den Boden beschränkt. Über Freiflächen kann auch die langwellige Ausstrahlung ungehindert in die Atmosphäre abstrahlen. Nachts führt dies zu einer rascheren Auskühlung von Parks verglichen mit den bebauten Stadtteilen. In *Abb. 1.4-1* wird das durch den unbebauten, 27 ha großen »Friedhof« illustriert, der am Abend 1,5 bis 2 ºC kühler ist als die darum liegenden Stadtteile. Ein Parkeffekt kann über die Ausmaße des Parks wirken und kühlt, je nach Windrichtung, das Klima der bebauten Umgebung. Parkeffekte im Temperatur- und Feuchtefeld wurden bis auf eine Distanz, die etwa dem Durchmesser des Parks entspricht, nachgewiesen (Oke et al. 2017).

Simulationen zeigen aber auch, dass viele kleine Parks, großflächige Dachbegrünungen und Straßenbäume die Stadt effektiver abkühlen lassen als wenige große Parks und zudem zielgerichteter die vulnerablen Bereiche (Wohnen, Arbeiten) betreffen (Matzarakis 2001). Für unsere Klimaregion bilden hohe breitkronige Bäume, die im Sommer die direkte Sonnenstrahlung abhalten und den Wind unterhalb der Krone zulassen, eine ideale und vielseitige Möglichkeit, das thermische Bioklima in städtischen Räumen zu verbessern. Weitere detailliertere Beispiele zum Einsatz und zur Eignung städtischer Grünflächen findet sich in den Kap. 6.2 Baumüller, Kap. 6.3 Meyer et al. und Kap. 6.10 Lee & Mayer - in diesem Band)

Das Klima städtischer Wasserflächen

Auch städtische Wasserflächen bilden ihr eigenes Mikroklima innerhalb der Städte aus. Wasserflächen (Seen, Teiche, Flussläufe, Brunnen) führen zu einer erhöhten Luftfeuchte und gleichzeitig in den meisten Fällen zu einer geringeren Lufttemperatur. Die geringere Temperatur wirkt sich positiv, die erhöhte Luftfeuchtigkeit aber oft negativ auf das thermische Wohlbefinden des Menschen aus (Theeuwes et al. 2013). Über einer Wasserfläche wird tagsüber die verfügbare Energie in Verdunstung (Q_E) und weniger in die Erwärmung der Luft (Q_H) gesteckt. Brunnen, die Sprühnebel und kleinste Wassertropfen erzeugen, sind am effektivsten im lokalen Kühlen, denn zum Verdunsten der Tröpfchen wird direkt der Luft fühlbare Wärme entzogen (Oke et al. 2017). Kühlen der oberflächennahen Atmosphäre in einem heißen und trockenen Klima kann beispielsweise effektiv erreicht werden, indem lokal Sprühnebel eingesetzt wird. Solche Effekte sind allerdings immer auf sehr kurze Distanzen (~10 m) limitiert.

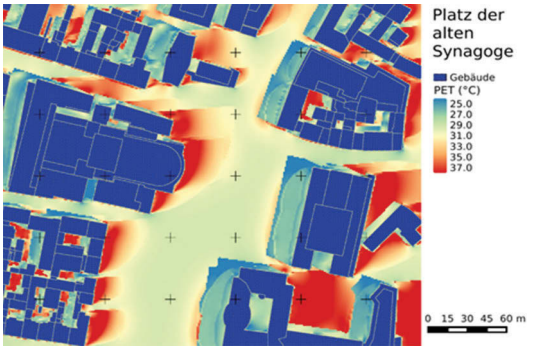


Abb. 1.4-2: *Räumliche Verteilung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) auf dem Platz der Alten Synagoge in Freiburg im Breisgau simuliert mit dem SkyHelios Modell (Fröhlich & Matzarakis 2019).*

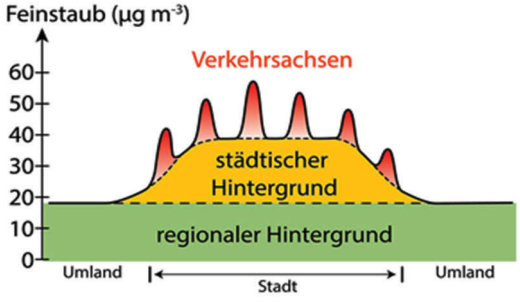


Abb. 1.4-3: *Konzeptioneller Transsekt der Luftschadstoffbelastung anhand von Feinstaub durch eine Stadt. Die Konzentration des Feinstaubes in der Stadt wird als Überlagerung der regionalen Hintergrundbelastung, der städtischen Hintergrundes und entlang von Verkehrsachsen auch mit lokalen zusätzlichen Belastungen erklärt (modifiziert nach Lenschow et al. 2001).*

Bei stehenden Wasserkörpern hängt der Effekt stark von der Größe der Wasserfläche und der Tiefe des Wassers ab, ggf. auch vom Witterungsverlauf, denn Wasser ist thermisch sehr träge. Der Effekt eines städtischen Sees ist zum Beispiel durch die abends bis zu 2 °C kühleren Lufttemperaturen um den »See« in *Abb. 1.4-1* ersichtlich. Es handelt sich um den 10 ha großen »Flückiger See«, der komplett von Siedlungsflächen umgeben ist. Theeuwes et al. (2013) haben mittels Modellen die Kühlwirkung von stehenden Wasserflächen in Städten auf das Bioklima modelliert. Ihre Studie zeigt, dass große Seen lokal zwar einen hohen Temperatureffekt aufweisen, dass aber mehrere kleinere Seen, die gleichmäßig im Stadtgebiet verteilt sind, einen geringeren Temperatureffekt haben, jedoch ein größeres Gebiet betreffen.

Kleinräumige Differenzierung der thermischen Belastung

Das physiologische Wärmeempfinden des Menschen wird nicht nur von der Lufttemperatur, sondern auch von den Einstrahlungsbedingungen (z.B. tages- und jahreszeitenabhängige Sonneneinstrahlung, Schattenwurf, thermische Wärmeabstrahlung der Gebäude), der Windgeschwindigkeit sowie insbesondere der Luftfeuchtigkeit beeinflusst (VDI 1998, Matzarakis 2001). Dabei ist die Lufttemperatur nicht immer der maßgebliche Faktor, sondern je nach Situation und Tageszeit können die Strahlungs- und Windverhältnisse dominierend sein. Charakteristisch für das Stadtklima sind Wärmebelastungen bis hin zum Hitzestress.

Die Methoden zur Bestimmung des thermischen Bioklimas des Menschen sind in der Richtlinie VDI 3787 Blatt 2 beschrieben (VDI 1998). Für die Bewertung der thermischen Komponente werden thermische Indizes eingesetzt, z.B. Physiologisch Äquivalente Temperatur (Mayer & Höppe 1987, Höppe 1999; Matzarakis et al. 1999). Alle diese Indizes benötigen die gleichen Eingangsgrößen und beruhen mehr oder weniger auf der Energiebilanz des Menschen (Höppe 1999, VDI 1998). In dem hier vorgestellten Beispiel wird die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) bestimmt. PET wurde gewählt, da sie die für den Anwender leicht verständliche Einheit °C verwendet. *Abb. 1.4-2* zeigt die Verteilung der PET ist für den Platz der Alten Synagoge dargestellt. Es zeigt sich, dass größte Variation im mikroskaligen Bereich überwiegend durch die Globalstrahlung und somit durch den Schatten von Gebäuden und Bäumen gesteuert ist (Fröhlich & Matzarakis 2019).

Die Definition des thermischen Komforts in einer Stadt beinhaltet auch einen psychologischen Aspekt. Das Thermische Wohlbefinden bzw. das Unbehagen

hängt sowohl von biophysikalischen Parametern als auch von individuellen Vorlieben ab und damit von kulturellen Kontexten, individuellen thermischen Erwartungen und der Akklimatisierung. Im Kontext des globalen Klimawandels sollten Anpassungsmaßnahmen in Städten darauf abzielen, dass die Hitze während des Tages reduziert wird, damit die thermische Belastung während Sommernächte erträglicher wird.

Kleinräumige Differenzierung der Luftschadstoffbelastung

Die räumliche und zeitliche Verteilung von Luftbeimengungen in Städten ist sehr komplex. In erster Approximation wird die Luftschadstoffbelastung an einem bestimmten Standort in der Stadt durch die Stärke und die Nähe zu lokalen Quellen modifiziert. Dies wird durch das horizontale Windfeld (Windrichtung), die vertikale Durchmischung sowie ggf. durch chemische Reaktionen weiter verändert. Dazu kommt bei Luftqualitätsfragestellungen, dass die Exposition einer Person durch deren Bewegungsmuster in der Stadt über die Zeit in diesen Konzentrationsfeldern bestimmt werden muss - eine komplexe Betrachtungsweise (Baumbach 1991).

Bei Luftschadstoffen unterscheiden wir zwischen einer regionalen Hintergrundbelastung, einem städtischen Hintergrund und lokalen *Hot-Spots* entlang von Verkehrsachsen oder Industrien (*Abb. 1.4-3*). Die regionale Hintergrundbelastung beschreibt die großräumige Konzentration an Luftschadstoffen außerhalb der Stadt (Aufwindbereich) aufgrund einer Vielzahl von regionalen und kontinentalen Quellen, die sowohl menschlichen als auch natürlichen Ursprungs sein können. Darauf addiert wird zusätzlich eine städtische Hintergrundbelastung, weil in der städtischen Grenzschicht durch die Stadt insgesamt die Konzentrationen angehoben werden. Entlang viel befahrener Stadtautobahnen, Straßen und in der Nähe von industriellen Punktquellen wird die Konzentration an *Hot-Spots* noch weiter angehoben. Die Reduktion der Schadstoffemissionen ist die beste Lösung des Problems, da man an der Quelle ansetzt. Dennoch kann auch durch Sicherstellen ausreichender Belüftung bzw. durch eine geschickte Lage der Emissionsquelle (hohe Schornsteine) erreicht werden, dass Schadstoffe schneller verdünnt und die Exposition der Stadtbevölkerung reduziert wird.

Schlussbemerkungen

Durch die dreidimensionale Struktur, die Materialen, den Versiegelungsgrad, den Grünanteil, die Emissionen von Wärme, Wasserdampf und Luftschadstoffen sowie die Lage der Stadt in Bezug auf Sonnenbahn und Windsysteme werden innerhalb von Städten eine Vielzahl von sich zeitlich ändernden Mikroklimaten geschaffen. Nachhaltige Stadtplanung und Architektur sollten diese Mikroklimate in eine Richtung modifizieren, so dass vorhandene, natürliche Ressourcen effizient genutzt, die Belastungen der Bevölkerung bei Extremwetterlagen reduziert und die Bevölkerung vor Gefahren geschützt wird. Für die Stadtplanung und Architektur braucht es Strategien, die leicht umgesetzt werden können und durch Messungen und Klimasimulationen quantifiziert werden. Da es oft nicht möglich bzw. sinnvoll ist die Temperatur, die Feuchte oder die Luftqualität direkt in einem Luftvolumen zu ändern, müssen wir die bestimmende Energiebilanz, die Wasserbilanz und die Emissionen modifizieren. Beispiele sind die geschickte Umstrukturierung von urbanen Flächen durch Entsiegelung, die Optimierung von Vegetation in Form von geeigneten Laubbäumen, den Einsatz von Wasser sowie Emmissionsreduktionen von Wärme und Luftschadstoffen direkt an der Quelle.

Literatur

BAUMBACH G. (1991): Luftreinhaltung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

FRÖHLICH D. & A. MATZARAKIS (2019): Spatial Estimation of Thermal Indices in Urban Areas - Basics of the SkyHelios Model. Atmosphere, 9, 209, 1-14.

HÖPPE P. (1999): The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. Int. J. Biometeorol. 43 , 71-75.

LENSCHOW P., H.-J. ABRAHAM, K. KUTZNER et al. (2001): Some ideas about the sources of PM_{10}. Atmospheric Environment, 35, S23-S33.

MATZARAKIS A. (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas. Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg Nr. 6.

MATZARAKIS A (2013): Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 73, 115-118.

MATZARAKIS A (2018): Das Stadtklima - Herausforderung heute und für die Zukunft. Der Architekt 5/2018, 36-39.

MATZARAKIS A., H. MAYER & M. IZIOMON (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. Int. J. Biometeorol. 43, 76-84.

MAYER H. & P. HÖPPE (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. Theor. Appl. Climatol. 38, 43-49.

MAYER H., A. MATZARAKIS & M. G. IZIOMON (2003): Spatio-temporal variability of moisture conditions within the Urban Canopy Layer. Theor. Appl. Climatol. 76, 165-179.

OKE T. R., G. MILLS, A. CHRISTEN & J. A. VOOGT (2017): Urban Climates, Cambridge University Press, ISBN 978-11-074-2953-6.

ROTACH M. W., R. VOGT, C. BERNHOFER et al. (2005): 'BUBBLE - an Urban Boundary Layer Meteorology Project'. Theor. Appl. Climatol. 81 (3-4): 231-261.

SPRONKEN-SMITH R. & T. R. OKE (1998): The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. Int. J. Remote Sens., 19 (11), 2085-2104.

THEEUWES N. E., A. SOLCEROVÁ & G. J. STEENEVELD (2013): Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city, J. Geophys. Res. Atmos., 118, 8881-8896.

VDI (1998) (2008): Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima. Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL), VDI 3787, Blatt 2, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Kontakt

Prof. Dr. Andreas Matzarakis
Deutscher Wetterdienst - Freiburg
Andreas.Matzarakis@dwd.de
Prof. Dr. Andreas Christen
Umweltmeteorologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
andreas.christen@meteo.uni-freiburg.de

Matzarakis A. & A. Christen (2019): Variabilität von meteorologischen Parametern in Städten. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 43-47. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.06.

1.5 Bedeutung der Kaltluft und Ventilation in Städten

Lutz Katzschner & Sebastian Kupski

Über die Hälfte der Bevölkerung weltweit lebt inzwischen in Städten. Die Städte nehmen an Zahl, Größe, Höhe und Verdichtung zu. Daraus ergeben sich Wärme-Belastungen und Luftverschmutzung Dem kann die Belüftung entgegenwirken. Das Stadtklima ist charakterisiert durch eine Erhöhung der mittleren Lufttemperatur bei gleichzeitiger Reduzierung der mittleren Windgeschwindigkeit im Vergleich zu den Flächen im städtischen Umland. Dabei hat eine wirkungsvolle Belüftung der Städte einen positiven Einfluss auf die Verdünnung und den Abtransport der Luftschadstoffe sowie die Abkühlung des Stadtgebietes. Wirksam sind sowohl regionale als auch lokale Belüftungssysteme z, die je nach Lage und Gestaltung der Stadt unterschiedlich wirken. In Stadtklimakarten werden sie als Luftleitbahnen oder Frischluftzufuhrräume kenntlich gemacht.

The Importance of Ventilation in Cities: *More than half of the world population now lives in cities. Urban develop in size, height and density. This results in thermal and air pollution loads. Ventilation can counteract. The urban climate is characterized by an increase in the average air temperature and lower average wind speed in comparison to the surroundings. Effective ventilation of cities has a positive influence on the dilution and removal of air pollutants and the cooling of the urban area. Both mesoclimatic and microclimatic ventilation systems are effective, depending on the location and design of the city. In urban climate maps, they are identified as air paths or fresh air supply from the surroundings.*

Die Wechselwirkung zwischen der unteren Atmosphärenschicht und den darin lebenden Menschen, Tieren und Pflanzen zu untersuchen, ist Aufgabe der Umweltmeteorologie. Als eines der Teilgebiete der angewandten Meteorologie wird die Beeinflussung der bodennahen Atmosphäre durch unterschiedliche Arten der Flächennutzung (z.B. Stadt, Wald oder Wiese) untersucht (Kuttler 2011). Hierbei spielt vor allem die Stadtklimatologie eine entscheidende Rolle, da zum einen der Hauptanteil der Bevölkerung in den Städten bzw. Ballungsräumen lebt und zum anderen, weil hier die größten anthropogenen Einflüsse und Veränderungen der Umwelt stattfinden.

Die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei gleichzeitig reduzierter Durchlüftung führt zu einer Belastung durch höhere Wärme und höhere Konzentration von Schadstoffen. Die thermische Belastung ist direkt abhängig von der Windgeschwindigkeit und der erhöhten Rauigkeit. Die reduzierte Belüftung führt zu Schadstoffakkumulation. Die thermische Belastung, meist ausgedrückt durch die physiologisch äquivalente Temperatur (PET), kann durch die Zunahme der Windgeschwindigkeit um nur einen halben Meter pro Sekunde schon um 5,9 Grad PET gesenkt werden. Der Luftaustausch in wärmebelastenden Stadtbereichen ist somit sehr hilfreich im Sinne der Human-Biometeorologie (Matzarakis 2001), auch bei einer nur geringen Zunahme der Windgeschwindigkeit (*Tab. 1.5-1*).

Grundlagen: Belüftung und Austauschprozesse

Luftaustauschprozesse werden maßgeblich von der Ausbildung des Stadtklimas mit beeinflusst (Kuttler 2013). Ein besonderes Merkmal der Stadt ist die Veränderung der Windverhältnisse sowohl hinsichtlich der Windrichtung als auch bezüglich der Windgeschwindigkeit. Die größere Oberfläche und Rauigkeit der Stadt bewirken eine Verminderung der Windgeschwindigkeit. Sie kann im Jahresmittel bis zu 30% niedriger sein. Insbesondere nimmt die Häufigkeit von sehr windschwachen Situationen – es gibt keine echten Windstillen – um bis zu 20% zu, was auch zu einer

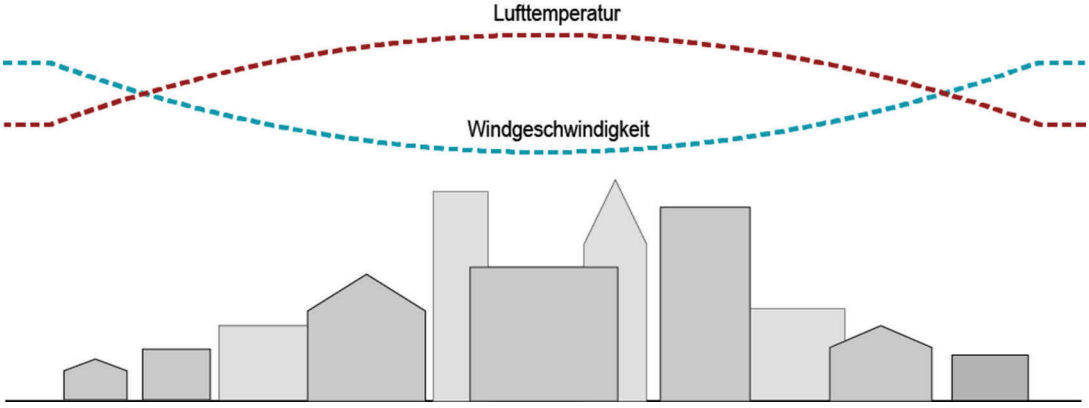


Abb. 1.5-1: *Typische Veränderung der mittleren Lufttemperatur und der mittleren Windgeschwindigkeit in Städten.*

Tab. 1.5-1: *Wirkung der Windgeschwindigkeit auf die thermische Behaglichkeit an einem typischen Sommertag.*

Lufttemperatur	Wasserdampfdruck	Windgeschwindigkeit	mittlere Strahlungs-temperatur	PET
° C	hPa	m/s	° C	° C
30	18	1,0	54	44,4
30	18	1,5	54	38,5
30	18	2,0	54	37

Verminderung des Luftaustausches führt und damit den Schadstofftransport behindert. Für die Belüftung eine Stadt sind sowohl die regionalen als auch die lokalen Windsysteme von Bedeutung, die sich insbesondere bei schwachem überregionalem Wind ausbilden. Thermische Winde können ähnlich einem Land-Seewindeffekt auch an Parkanlagen auftreten.

Für die Belüftung einer Stadt wird unterschieden (Weber & Kuttler 2003) in:

- Ventilationsbahnen oder Luftleitbahnen, die lediglich einen Lufttransport in Richtung Siedlungszentrum gewährleisten sollen,
- Kaltluftbahnen mit niedrigerer Temperatur als in der Stadt, jedoch ohne weitere lufthygienische Klassifizierung sowie
- Frischluftbahnen mit unterschiedlicher Temperatur der transportierten Luft, jedoch weniger schadstoffbelastet.
- Flurwinde, wenngleich schwer nachweisbar, gehören zu der Kategorie der thermisch induzierten Winde. Oft werden diese jedoch von regionalen Windsystemen überlagert. Bei ungestörten Bedingungen bildet sich in der wärmeren Stadt ein niedrigerer Luftdruck (thermisches Tief), welches eine bodennahe Strömung aus dem Umland in die Stadt bewirkt. In Bochum konnte dies mit stationären Messungen nachgewiesen werden (Barlag 1990). Bei Beckenlagen können nächtliche Hangabwinde diesen Effekt verstärken; Flurwinde dienen zumeist auch als Frischluftzufuhr für die Innenstadt, zumeist dienen Täler als Frischluftschneisen.

Erstere, zu denen Hangwinde sowie Berg- und Talwinde gehören, sind stark durch das vorhandene Relief geprägt. Diese Zirkulation ist vor allem bei Städten in Tal- und Kessellagen von Bedeutung, da sie zum Schadstoffabtransport sowie zur Frischluftzufuhr beiträgt. Die Ausprägung der vor allem nachts bodennah stattfindenden Kaltluftflüsse ist abhängig von der Größe der die Kaltluft produzierenden Flächen sowie von der Hangneigung. Flurwinde, sind sehr viel schwerer nachweisbar und weniger ausgeprägt. Sie haben ihre Bedeutung bei Städten mit gering ausgeprägtem Relief und sind stadteinwärts gerichtet.

Sinnvollerweise wird in den Stadtklimakarten die Belüftung in Kategorien eingeteilt. Zum einen in die Luftleitbahnen als Belüftungskorridore mit geringer Bodenrauigkeit ($z_o < 0{,}2$ m), um auch die regionalen Zirkulationen aufnehmen zu können und zum anderen in Frisch- bzw. Kaltluftabflussbahnen (VDI 2015, Bl.1). Luftleitbahnen, die von Freiflächen ohne Emittenten gespeist werden und auf ihrem Weg frei von Emissionen sind, sind als Frischluftbahnen definiert. Ihre Eigenschaft ist es meist, unbelastete Luft zu transportieren und belastete Gebiete auf diese Weise zu entlasten.

Kaltluftbahnen hingegen sind Korridore, die von landwirtschaftlichen Flächen (Acker, Weiden, Streuobstwiesen) gespeist werden, die durch ihre physikalischen Bedingungen rascher abkühlen. Diese Kaltluft muss auf ihrem Weg nicht zwangsläufig frei von Immissionen sein. Kaltluft dient vor allem dazu, Überwärmung abzubauen.

Ventilationsbahnen und Durchlüftungsbahnen nehmen die Anströmung bei austauschreichen Wetterlagen, mit ausreichender Belüftungsintensität auf und sorgen für eine Verbesserung der städtischen Luft. Diese Bahnen beziehen sich nicht auf unterschiedliche Temperaturniveaus oder Belastungskriterien, sondern sind Indiz für eine Durchmischung und Abtransport der städtischen Luft.

Kriterien für die Ausweisung solcher Luftleitbahnen ist die Rauigkeitslänge, die entweder über das vertikale Windprofil oder den Landnutzungstyp

gewonnen werden kann (Stewart & Oke 2012, Ren 2018). Sinnvoll für eine räumliche Analyse sind die Rauigkeiten nach Flächennutzung (Beckröge 1994). Daraus geht hervor, dass schon bei einer Einzelhausbebauung mit einer Rauigkeitslänge von $z_o > 0,5$ m dies nicht mehr zur Luftleitbahn gezählt werden kann. Im Folgenden kann durch die räumliche Anlayse der Bodenrauigkeit (z_o) eine qualitative Beschreibung der Wirkungen des Luftaustausches vorgenommen werden (Ren 2018) (*Tab. 1.5-2*).

Aus diesen Erkenntnissen heraus sind Planungshinweise räumlich möglich. Darin können Aussagen zur Barrierewirkung, Kaltluftstrom und die Beschaffenheit der Siedlungsränder, also z.B. der Übergang zur Bebauung getroffen werden.

Beispiel

Im folgenden Beispiel soll die Bedeutung der Kaltluft näher beschrieben werden, da vor allem die nächtliche Kaltluft während sommerlicher Hitzeperioden sehr stark von der Flächennutzung und der Topografie abhängt und bekannt dafür ist sowohl großräumig als auch kleinräumig zu wirken.

Bei geeigneten Ausstrahlungsbedingungen bildet sich nachts über Flächen wie Wiesen oder Äckern kalte Luft. Durch die Abkühlung der Oberflächen kühlen auch die bodennahen Luftschichten aus (Sievers et al. 1983). Über geeignete Hänge kann nun die Kaltluft »abfließen«. Geeignete Korridore sind wiederum naturnahe Flächen, Bachläufe etc. die die Fließrichtung und Hangneigung aufnehmen. Trifft dieser Kaltluftstrom einen Siedlungsbereich hängt es von mehreren Faktoren ab, in wieweit er sich aufstaut, die Struktur überfließt oder durchfließen kann. In *Abb. 1.5-2* ist ein Kaltluftabfluss dargestellt, der von sich abkühlenden Hängen abwärts in Richtung Stadt gerichtet ist. Die Gebäude in den Hanglagen sogen für eine Umlenkung, die Fließrichtung ist durch die Pfeile gekennzeichnet, die Farbe und Schummerung zeigen die dreidimensionale Topografie.

Grundlage der *Abb. 1.5-2* ist eine Berechnung mit dem Programm KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2016). Abgebildet ist der Kaltluftabfluss in 2 m über dem Boden. Trotz lockerer Bebauungsstruktur (graue Kuben = Bauwerke) wird deutlich, dass der Kaltluftabfluss vor allem auf den Schneisen und Kor-

Tab. 1.5-2: *Qualitative Klassifizierung der Rauigkeitslänge zo für die Durchlüftungswirkung (Ren 2018).*

Klasse	Qualitative Beschreibung	z_o [m]
1	geringe Wirkung	> 1,0
2	klein	0,5 – 1,0
3	mittel	0,5 – 0,7
4	hoch	0,2 - 0.5
5	sehr hoch	< 0,2

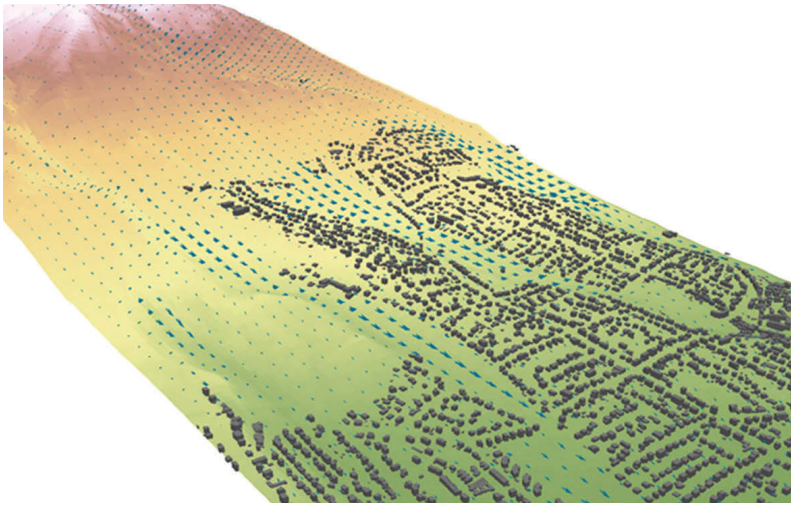


Abb. 1.5-2: *Kaltluftabfluss in 2 m Höhe und 3 Stunden nach Sonnenuntergang für einen Stadtrandbereich Kassels mit einem Höhenunterschied 150 m; große Pfeile max. 1,8 m/s; kleine Pfeile 0,5 m/s.*

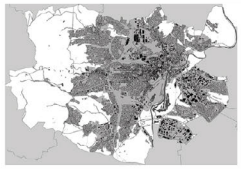
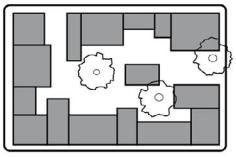
Administrativ	Planungsebene	Stadtklima	stadtklimatische Fragestellung
 Region	Regionalplan M 1: 100.000	Mesoklima	regionale Luftaustausch-prozesse
 Stadt	Stadtentwicklung/ Flächennutzungs-plan M 1: 10.000	Mesoklima/ Stadtklimaklimatope	Wärmeinsel Stadt, Belüftungsstrukturen
 Ortsteil	Bauleitplanung M 1: 5.000	Freiraumklima	Luftaustausch
 Block	Bauleitplanung M 1: 2.000	Innenhofklima	Mikroklimatische Untersuchungen (Strahlung, Wind)
 Gebäude	Objektplanung M 1: 500	Gebäudeklima	Strahlung und Gebäude-umströmungen

Abb. 1.5-3: *Planungsebenen und klimatische Fragestellungen (VDI 2007, Bl1).*

ridoren stattfindet, zwischen den Bauwerken herrscht eine Reduzierung der Fließgeschwindigkeit.

Anhand der Spalte der stadtklimatischen Fragestellung der *Abb. 1.5-3* zeigt sich beispielhaft, wie häufig der Luftaustausch auf den verschiedenen Maßstabsebenen thematisiert wird. Hierbei geht es von großräumigen Luftaustauschprozessen auf regionaler Ebene bis hin zu kleinräumlichen, in wie fern einzelne Bauwerke als Strömungshindernis auftreten.

Es ist somit stets zu beachten, den entsprechenden Maßstab passend zur Fragestellung zu ermitteln, um belastbare klimatische Aussagen treffen zu können. Andernfalls würde ein falscher Grad der Detailtiefe zu Unsicherheiten führen und klimatische Fehlinterpretationen verursachen. Auch könnten Unschärfen bei kleinräumiger Planung dazu führen, dass Details übersehen werden, die unter Umständen einen entscheidenden Einfluss haben (*Abb. 1.5-3*).

Fazit

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Verdichtung der Städte einhergehend mit erhöhten thermischen und lufthygienischen Belastungen kann durch eine ausreichende Belüftung Ausgleich geschaffen werden. Eine qualitative und quantitative Beschreibung erfolgt dann in den Klimafunktionskarten, sowie in den daraus abgeleiteten Planungshinweiskarten (VDI 2015). Hier werden die Funktionen und Wechselwirkungen aufgezeigt und die teils empfindlich reagierenden lokalen Windsysteme dargestellt.

Vor allem die kühlende Wirkung der nächtlichen Kaltluft, die Kaltluftentstehungsgebiete und -abflussbahnen mit einer hohen ökologischen Wertigkeit gelten als besonders schützenswert und haben Ausgleichsfunktion. Diese Eigenschaften werden in den kommenden Dekaden mit weiter ansteigenden Temperaturen noch wichtiger, damit die Städte auch weiterhin lebenswert sein können.

Aussagen auf der Basis bisher vorliegender numerischer Modellierungen zum Verhalten von Windfeldern bei weiterem Klimawandel lassen keine eindeutigen Schlüsse zu. Vielmehr weisen entsprechende Projektionen darauf hin, dass sich die derzeitige mittlere Windgeschwindigkeit, aber auch die Böigkeit des Winds, in Zukunft kaum ändern wird.

Bioklimatisch hochbelastete Räume, geprägt durch schwache Winde bei gleichzeitig hoher thermischer Belastung sind also die besonders betroffenen Gebiete. Aber auch die Bereiche mit meist gebäudeinduzierter Verstärkung von mittlerer Windgeschwindigkeit und Böigkeit gilt es im Sinne einer nachhaltigen Stadtplanung zu identifizieren.

Literatur

BAUMÜLLER J., U. HOFFMANN & U. REUTER (2007): In Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), Städtebauliche Klimafibel-Online - Hinweise für die Bauleitplanung-, überarbeitete und ergänzte Internetversion der Städtebaulichen Klimafibel.

BARLAG A. & W. KUTTLER (1990): The Significance of Country Breezes for Urban Planning. Energy and Buildings 15, 3–4, Lausanne, pp 291-297.

BECKRÖGE W., H. MAYER & A. MATZARAKIS (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen, UVP Report 5/94, Hamm.

DWD (Deutscher Wetterdienst) (2016): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Deutscher Wetterdienst, Klima- und Umweltberatung.

KUTTLER W. (2013): Klimatologie, Schöning UTB.

KUTTLER W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen; Climate change in urban areas, Part 1, Effects. In: Environmental Sciences Europe (ESEU), Springer open, DOI: 10.1186/2190-4715-23-11, S. 1-12.

MATZARAKIS A. (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas, Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Nr. 6. Freiburg.

SIEVERS U., R. FORKEL & W. ZDUNKOWSKI (1983): Transport equations for heat and moisture in the soil and their application to boundary layer problems. Contrib. Atmos. Phys., 56, 58-83.

STEWART D. & T. R. OKE (2012): Local climate zones for urban temperature studies. American Meteorological Society. DOI:10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

REN C. (2018): Creating breathing cities by adoting urban ventilation assessment and wind corridor plan, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 182 (2018) 170-188.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2015): VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1: Umweltmeteorologie - Klima und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, Beuth Verlag, Berlin.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2007): VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1: Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Beuth Verlag, Berlin.

WEBER S. & W. KUTTLER (2003): Analyse der nächtlichen Kaltluft-dynamik und-qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft 63 (9) 381-386.

Kontakt:
Prof. Dr. em. Lutz Katzschner
Universität Kassel
Sebastian Kupski
Institut für Klima- und Energiekonzepte
katzschn@uni-kassel.de

Katzschner L. & S. Kupski (2019): Bedeutung der Kaltluft und Ventilation in Städten. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 48-52. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.07.

1.6 Anfordergen an eine nachhaltige Stadt

Hilmar von Lojewski

Städte sind mit mehr als 70 % der weltweiten Treibhausgasemissionen Treiber des Klimawandels; gleichzeitig aber entwickeln sie Lösungen für eine Verringerung der Treibhausgasemissionen und für eine Anpassung an den Klimawandel und setzen sie auch im Rahmen ihrer Möglichkeiten um. Diese werden gemeinhin unter dem Titel der nachhaltigen und integrierten Stadtentwicklung, zunehmend aber auch unter dem Slogan »Smart and sustainable cities« propagiert. Es stellt sich die Frage, ob die hierunter subsumierten Strategien für eine Reduktion der Treibhausgase bis 2050 auf Null tragen oder ob es einer Alternative dazu bedarf. Diese liegt womöglich in einer breit ausgerollten sektorübergreifenden Suffizienzstrategie und der Gleichzeitigkeit von Anreizen und Regulativen, um Produktions-, Konsum- und Mobilitätsmuster schnell zu verändern. Allerdings wird jede Form der Anpassung und der Vermeidung des Klimawandels in den Städten nicht umhin kommen, sich an den Indikatoren der Nachhaltigkeitsziele messen zu lassen. Die eigentliche Herausforderung für eine klimagerechte Stadtentwicklung liegt darin, räumliche und zeitliche Dimensionen so miteinander in Einklang zu bringen, dass mit den eingesetzten Ressourcen in kürzest möglicher Zeit an den richtigen Standorten die verfolgten Wirkungen eintreten. Diese müssen gleichermaßen in der Mitigation liegen, also der unverzüglichen Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen und in der Adaption, also der Anpassung an das unvermeidliche Ausmaß des Klimawandels.

***Requirements for sustainable cities:** Cities are driving climate change with more than 70 % of global greenhouse gas emissions, while developing and implementing solutions to reduce greenhouse gas emissions and adapt to climate change.These are commonly propagated under the title of sustainable and integrated urban development, but increasingly under the slogan »Smart and sustainable cities«. The question arises whether the strategies subsumed under this heading lead realistically to a reduction of greenhouse gases to zero by 2050 or whether a strategic alternative is needed. This might rather lay in the context of a cross-sectoral sufficiency strategy and the simultaneity of incentives and regulatives to rapidly change consumption and mobility patterns. However, any form of adaptation and avoidance of climate change in cities needs to be measured against the indicators of the sustainable development goals. The actual challenges for climate-friendly urban development are to reconcile spatial and temporal dimensions in such a way that the resources lead to the effects pursued at the right locations. These must be equally focussing at mitigation, i.e. the immediate reduction of greenhouse gas emissions, and at adaptation, i.e. the adaptation to the inevitable extent of climate change.*

Grundlagen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung in den Städten

Der Klimawandel und seine Auswirkungen wie Extremwetterereignisse in Form von Starkregen, schweren Gewittern, Stürmen, anhaltender Trockenheit und Hitze stellen schon heute die Städte international und auch in Deutschland vor große Herausforderungen. Die aktuellen globalen bzw. regionalen Klimaprojektionen des *Intergovernmental Panel for Climate Change* (IPCC), des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK), des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und anderer lassen erwarten, dass sich diese Entwicklungen noch verstärken. Die daraus resultierenden Belastungen und Risiken für die Bevölkerung, Unternehmen, die öffentliche Infrastruktur sowie Natur und Umwelt werden dadurch in dichter besiedelten Städten und Regionen sowie entlang von Fließgewässern weiter steigen.

Das Pariser Übereinkommen (COP 21) vom Dezember 2015 darf als »historische Wegmarke« für weltweite Anstrengungen zur Beschränkung der Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius gelten. Spätestens nach dem Klimagipfel Fidschi/Bonn 2017 scheint dieses Ziel jedoch in weitere Ferne gerückt zu sein. Alle Szenarien zeigen auf, dass das Erfordernis, die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren und Maßnahmen zur Klimaanpassung zu ergreifen, größer wird. Dies bedeutet für die Städte, noch mehr Anstrengungen für Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel unternehmen zu müssen.

Klimaanpassungskriterien in der Stadtentwicklung finden in einigen Städten Deutschlands bereits seit der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts Berücksichtigung. Stuttgart beispielsweise hat aufgrund seiner topografischen Bedingungen bereits in den 1930er Jahren meteorologische Erkenntnisse zur Grundlage planerischer Konzepte gemacht (Gedikli 2018). Der erste Klimaatlas wurde schon 1987 aufgelegt. Dem folgten in Deutschland auf allen räumlichen Ebenen (Raumordnung und Landesplanung, Regionalplanung, vorbereitende und verbindliche Bauleitplanung) und mit einer Vielzahl an Planungsinstrumenten zunehmend klimatologisch-topografische Adaptionsstrategien. Diese schlagen sich in zahlreichen Städten z. B. in der Identifizierung von Klimatopen nieder, die durch morphologische Faktoren und die Bebauungsstruktur bestimmt werden. Sie enthalten u. a. die Wärmelast der Städte, die Durchlüftung und meistenteils auch Aspekte der Luftverschmutzung, die Bezeichnung besonders gefährdeter Gebiete und ein breites Spektrum an Maßnahmen zur Vermeidung von klimatologischen Belastungen und kompensatorischen Maßnahmen. Das Umweltbundesamt hat hier bereits 2012 ein umfassendes Kompendium zum Klimaschutz in der räumlichen Planung und den Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung herausgegeben.

Die Städte setzen sich vor Ort, überregional und in ihren nationalen und internationalen Netzwerken seit langem für den Klimaschutz ein. Zahlreiche Städte in Deutschland haben inzwischen unterschiedlich ausdifferenzierte Klimakonzepte aufgestellt. Dies wurde u.a. durch das Programm des Bundesministeriums für Umwelt (BMU 2018) zu »100 % Klimaschutz« befördert, dem sich viele Städte angeschlossen haben. Eine Abfrage des Deutschen Städtetages unter den größeren Mitgliedstädten hat ergeben, dass fast alle Städte mittlerweile über Konzepte und Maßnahmenprogramme zur Klimaanpassung verfügen und zumindest einen Teil der geplanten Maßnahmen auch umsetzen. Hindernisse ergeben sich insbesondere in der personellen Ausstattung und in der Finanzierung der Vermeidungs- und Anpassungsstrategien. Diese beziehen sich entweder auf das gesamte Stadtgebiet oder definieren besonders belastete Gebiete und die hier heranzuziehenden Maßnahmen. Für die Mitigation stehen neben der Energieeinsparung und dem Einsatz erneuerbarer Energien sowohl die energetische Gebäudesanierung als auch die Förderung umweltfreundlicher Verkehrsträger im Vordergrund. Als überwirkendes Ziel gilt die Beförderung nachhaltiger Siedlungsstrukturen (»Städte und Regionen der kurzen Wege«).

Auch die räumliche Planung in den Städten hat durch entsprechende Darstellungen in Flächennutzungsplänen und Festsetzungen in Bebauungsplänen auf diese Erkenntnisse reagiert. Die Planungsinstrumente suchen vielfach, sowohl Anpassungs- als auch Vermeidungsziele bodenrechtlich umzusetzen. Neben sektoralen Konzepten zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung erweisen sich integrierte Stadt- und Quartiesentwicklungskonzepte als praxisgerechte Lösung. Sie verzahnen die sektoralen Themen untereinander, beziehen sie auf eine räumliche Ebene und fassen die verschiedenen sektoralen Programme und Projekte zu Maßnahmebündeln zusammen. Dies erleichtert es, Synergien zu heben, Kosten zu sparen und komparative Vorteile zu nutzen. Das erfordert jedoch entsprechende organisatorische Vorkehrungen für die aufwändige aber unvermeidliche sektorübergreifenden Koordination und die notwendige politische Rückendeckung.

Für umfassende Ansätze dieser Art haben inzwischen viele Städte und Landkreise den »Klimanotstand« erklärt. Das hilft, jegliche Planungen, Investitionen und Vorhaben auf ihre Klimaverträglichkeit hin zu prüfen. Bei einer ernsthaften Umsetzung des »Klimanotstands« bildet dieser die Legitimationsgrundlage, mehr Mittel für Klimaverträglichkeit in Form von Investitionen, insbesondere im baulichen und verkehrlichen Bereich, einzusetzen. Dies hilft, auch die Beschaffung an Nachhaltigkeitskriterien auszurichten.

Das »Wie« der Anwendung von Mitigationsstrategien in der räumlichen Planung darf als weitestgehend geklärt gehalten. Kritischer bleibt das »Ob« des Klimaschutzes. Denn der Durchführung von konkreten Energieeinsparmaßnahmen stehen zahlreiche Faktoren



Abb. 1.6-1: *Klimastrategie in der integrierten Stadtentwicklungsplanung Quelle:* DIFU *(2015), S. 83.*

entgegen. Dazu gehören im Baubereich eine noch zu geringe Inzentivierung und im Verkehrsbereich zu wenig durchgreifende Regulative zur aktiven Energieeinsparung. Im bauenden Bereich zählen dazu deutlich mehr aktive energetische Sanierungsberatung verbunden mit je nach Zielgruppe differenzierten Förderinstrumenten wie steuerliche Förderung und Investitionszuschüsse. Im verkehrlichen Bereich reichen die Maßnahmen von der Parkraumbewirtschaftung des ruhenden Verkehrs, einer angemessenen Gebührenregelung für das Anwohnerparken, über zeitlich und räumlich differenzierten Zufahrtsbeschränkungen bis hin zu einer Maut, die für eine optimale Lenkungswirkung der Verkehre Zeit, Raum und Fahrzeug berücksichtigt. Zudem nehmen die Entfernungen zwischen Wohn-, Arbeits-, Bildungs-, Einkaufs- und Erholungsorten weiter zu. Und auch die Förderung der weiteren Zersiedlung durch die keineswegs eingedämmte Suburbanisierung und eine im Zuge der Diskussion des Klimaschutzpakets der Bundesregierung im Herbst 2019 womöglich sogar noch steigende Entfernungspauschale stellen hinter das »Ob« des Klimaschutzes in der räumlichen Planung ein dickes Fragezeichen.

Daher führt der Klimawandel allen bisherigen Bemühungen zum Trotz zu erhöhten Risiken für die Bewohner der Städte, die kommunale Infrastruktur oder das Stadtgrün. Hochsommerliche Extremtemperaturen, starke Niederschläge, Dürreperioden und Stürme werden weiter zunehmen. Dies erfordert zusätzliche Anpassungen bei der Planung, beim Betrieb und beim Ausbau der Infrastruktur. Von großer Bedeutung für das Stadtklima sind neben den städtebaulichen Rahmenbedingungen auch die Kalt- und Frischluftproduktionsflächen und -austauschbahnen innerhalb des Stadtgebietes. Grünräume im Stadtgefüge gewinnen sowohl als Retentions- und Überflutungsflächen als auch zum Hitzeausgleich an Bedeutung. Auf der Grundlage von Szenarien und Prognosen müssen daher stadtteilbezogene Betrachtungen für Verbesserungsmaßnahmen des Stadtklimas angestellt werden. Ziel der Maßnahmen muss es sein, die Folgen der Klimaänderungen in der Stadt und für die Stadt zu minimieren und die Städte in ihrer physischen Charakteristika an den Klimawandel anzupassen (Adaption).

Nicht erst angesichts der aktuell wahrnehmbaren Phänomene des Klimawandels geht es darum, bei allen Investitionen die zu erwartenden Klimaänderungen zu berücksichtigen. Das politische Bekenntnis zum Ausbau erneuerbaren Energien hat in Deutschland bereits erhebliche positive Wertschöpfungseffekte ausgelöst. Dies kann und muss sich national, europa- und weltweit vervielfältigen. Die geforderte intensivere Beschäftigung mit Klimaschutz- und Anpassungsstrategien zur Bewältigung des Klimawandels besitzt ein hohes ökonomisches Potential, insbesondere für die Städte. Neue Formen des Wirtschaftens, die weniger Schadstoffe emittieren und sich weniger negativ auf die Umwelt auswirken, werden zunehmend wichtiger. Sie müssen gleichermaßen gefördert (Inzentivierung) wie gefordert werden (Regulative). Gemeinsam mit den Städten engagieren sich inzwischen auch Industrie und Dienstleistungsunternehmen mit vielfältigen Ideen, Produkten und Dienstleistungen für die Bewältigung konkreter Auswirkungen des Klimawandels. Diese gesamtgesellschaftliche Herausforderung schafft neue Arbeitsplätze, kann Wohlstand sichern und stärkt das Profil vieler Städte als Standort für nachhaltiges Wirtschaften.

Klimaschutz in den Städten

Stadtplanung und Städtebau liefern zahlreiche Beispiele für den Klimaschutz. Hierzu zählen neben umfassenden Integrierten Stadtentwicklungskonzepten (InSEK), die auf eine nachhaltige Siedlungsflächenentwicklung und umweltverträgliche Verkehrskonzepte setzen, Klimaschutzkonzepte mit konkreten Zielsetzungen zur sektorweisen Reduzierung von Treibhausgasen. Auch die förmlichen Instrumente der räumlichen Planung – Flächennutzungs- und Bebauungspläne – treffen Darstellungen und Festsetzungen, die einen deutlichen Bezug zu den Klimaschutzzielen aufweisen. Das betrifft in Flächennutzungsplänen die räumliche Anordnung unterschiedlicher Nutzungskategorien in möglichst großer räumlicher Nähe zu einander (Wohnen, Arbeiten, Bildung, Gesundheit, Einkaufen) genauso wie die Darstellung verdichteter und gezielt gemischt zu entwickelnder Bauflächen. Hinzu tritt die Sicherung oder Freihaltung von Schienenverkehrstrassen, Güterbahnanschlüssen, Güterverkehrs- und Logistikstandorten mit Schienenanschluss uvam. Bebauungspläne treffen bspw. kleinteilige Festsetzungen zu energetischen Maßnahmen, Solarenergie, Solarthermie, Kraft-Wärme-Kopplung, Anschluss an Fernwärmenetze und zur Fassaden- und Dachbegrünung und sichern die flächenhaften Darstellungen des Flächennutzungsplans auch gegenüber den Grundstückseigentümern bodenrechtlich.

Die Krux liegt darin, dass Darstellungen und Festsetzungen in Bauleitplänen, die insbesondere dem Leitbild der »Stadt der kurzen Wege« und den Energieeinsparzielen versuchen zu entsprechen, kaum in baulichen Beständen Rechnung getragen werden kann. Diese genießen Bestandsschutz und sind nur sehr sukzessive strukturellen Änderungen in Richtung Nut-

zungsmischung und größerer Dichte zugänglich. Allein jedoch mit den Darstellungen und Festsetzungen für Neubauflächen, die kaum mehr als 1 % des baulichen Bestandes pro Jahr ausmachen, lässt sich die notwendige Transformation zu mehr Klimaschutz in den Städten kaum bewerkstelligen. Die baulichen Bestände aber lassen sich daher nur mit erheblichem Einsatz von Fördermitteln transformieren.

Dessen ungeachtet gibt es keine Alternative zu diesem Leitbild – ohne Städte und Regionen zumindest der »kürzeren Wege« und eine möglichst umfassende Umstellung auf regenerative Energieerzeugung wird es keine relevanten Energieeinsparungen im Verkehrssektor geben. Denn allein mit der Verkürzung der in den letzten Jahren stetig zunehmenden täglich zurückgelegten Wege um 10 %, ließen sich 10 Mio. t CO_2 im Jahr einsparen – allerdings von ca. 870 Mio. t CO_2-Emissionen im Jahr. Diese Wege müssen zudem in einem deutlich höheren Ausmaß als mit bislang 20 % der Verkehrsleistung in Deutschland durch die Verkehrsmittel des Umweltverbunds von Schienenpersonennahverkehr (SPNV), Öffentlichem Personennahverkehr (ÖPNV), Fahrräder und Fußgänger zurückgelegt werden. Denn die vorherrschenden 80 % der Personenverkehrsleistung durch den motorisierten Individualverkehr und gut 70 % der Güterverkehrsleistung durch den Lkw-Verkehr bedeuten vergeblichen Klimaschutz. Zudem beeinträchtigen sie die Luftqualität und den Lärmschutz in Städten und vermindern die Qualität des Aufenthalts in öffentlichen Räumen und des Wohnens und Arbeitens in Städten und Regionen.

Klimaanpassung in den Städten

Ein Maßnahmenkatalog zur Anpassung an den Klimawandel für die zentralen Bereiche der Städte muss wichtige Handlungsfelder für die Ausrichtung des Anpassungsprozesses in den Städten aufzeigen. Diese sollten mit Empfehlungen für Maßnahmen zum Klimaschutz verbunden sein. Im Vordergrund sollten solche Maßnahmen stehen, die Klimaschutzbelangen und sonstigen ökologischen Anforderungen nicht widersprechen. Im besten Fall sollten sie sich vielmehr ergänzen (z. B. Wärmedämmmaßnahmen als gleichzeitiger Hitzeschutz). Zusätzlich sollte eine Koordinierungsstelle Empfehlungen für den notwendigen ganzheitlichen Planungsansatz zur Adaption und die Koordination der Einzelmaßnahmen geben. Fortlaufendes Monitoring und die regelmäßige Evaluierung

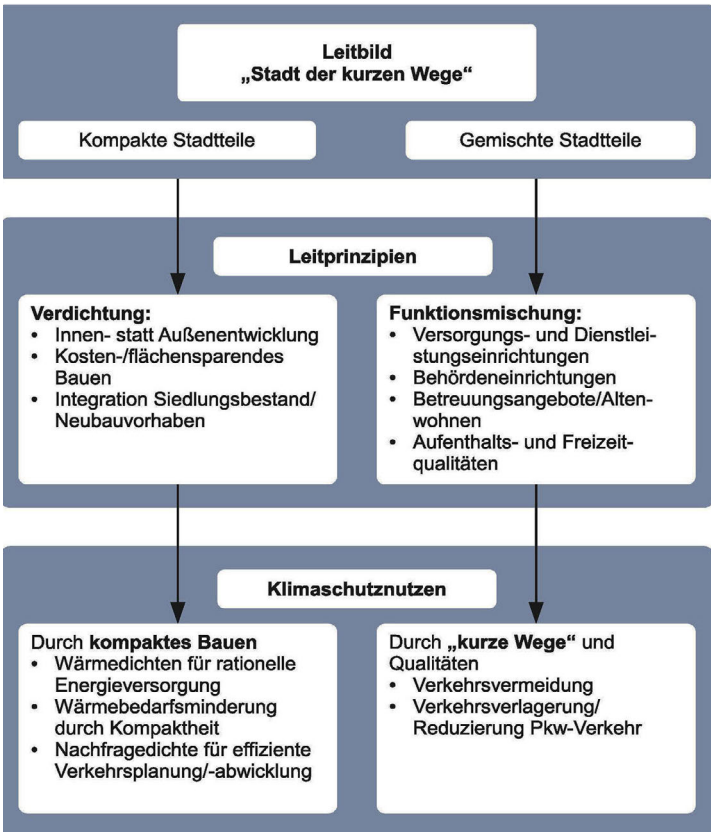
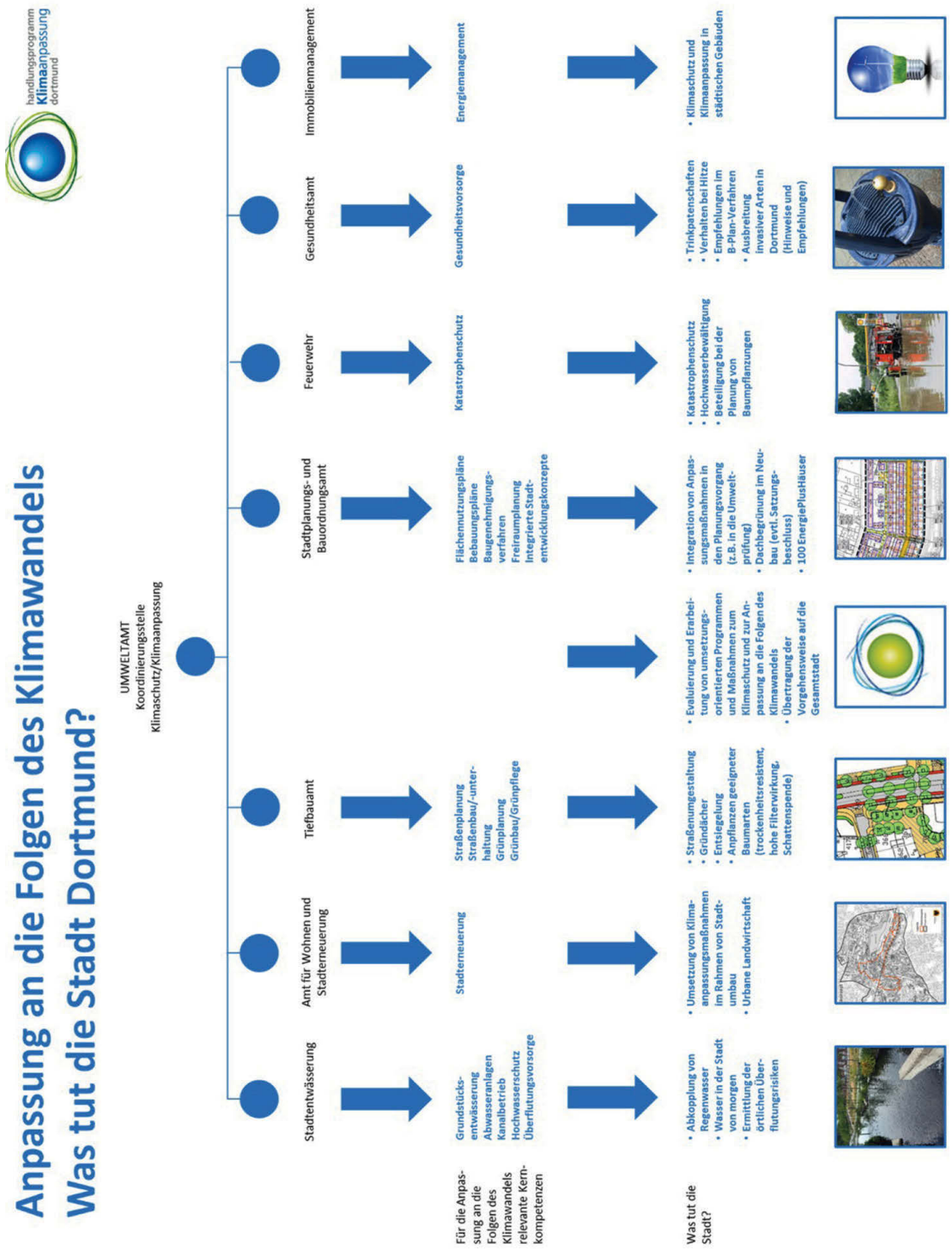


Abb. 1.6-2: *Leitbild »Stadt der kurzen Wege«. Quelle: UBA (2012), S. 74.*

Abb. 1.6-2: *Umsetzung von Maßnahmen zum Klimafolgenkonzept. Quelle: Stadt Dortmund (2017) – Schlussbericht Projekt »DAS: Klimafolgenanpassungskonzept für den Stadtbezirk Dortmund-Hörde«, Dortmund/Essen.*



der erzielten Ergebnisse sind dabei dringend erforderlich, um einerseits in einem laufenden Prozess die Klimaanpassung zu optimieren und andererseits positive Erfahrungen für andere Städte nutzen zu können.

Eine derart umfängliche Klimaanpassungsstrategie zieht erhebliche zusätzliche Investitionen nach sich. Dies können nicht allein durch die Städte bewältigt werden. Deshalb müssen die Städte durch ihre jeweiligen Regierungen bei der Umsetzung der Klimaanpassungsmaßnahmen über das bisherige Maß hinaus noch deutlich stärker und finanziell unterstützt werden – eine Forderung, die sich fraglos auch auf den globalen Maßstab übertragen lässt. Dies wird einen Klimaanpassungsfonds erfordern, der die Mittel nach dem Anpassungerfordernis und der von den Klimaänderungen betroffenen Zahl der Menschen differenziert verteilt. Das ermöglicht komparative Vorteile und kann zu einer deutlich grundsätzlicher ausgestalteten Klimagerechtigkeit führen, als das Verfolgen ausschließlich national orientierter Maßnahmen.

Klimaanpassungsmaßnahmen beziehen sich insbesondere auf die Handlungsfelder Gesundheit, Katastrophenschutz, Stadtplanung und Städtebau, Grün- und Freiflächen, Mobilität und Verkehr, Wasser, Boden, Biotop- und Artenschutz. Ein Beispiel für einen umfassenden methodischen Handlungsansatz mit einer Vielzahl an Empfehlungen für konkrete Adaptionsmaßnahmen bietet der Deutsche Städtetag (DST 2019). Ein Beispiel für einen umfassenden kommunalen Ansatz liefert das Handlungsprogramm der Stadt Dortmund (2017) (*Abb. 1.6-3*).

Hierzu zählen u.a. die Maßnahmen in den Handlungsfeldern Stadtplanung und Städtebau, Verkehr und Mobilität. Allein das Handlungsfeld Stadtentwicklung und Stadtplanung steht stellvertretend für die Vielzahl an gegenseitigen Abhängigkeiten und zeigt das Erfordernis integrierter Handlungskonzepte auf:

In fast allen Städten wird in Deutschland, Europa und global der Wohnflächenbedarf absolut und pro Kopf weiter deutlich zunehmen. In vielen Kommunen besteht zudem Sanierungs- und Erneuerungsbedarf in Bestandsflächen. Zusätzlich wird dieser Trend durch eine für Deutschland bemerkenswerte neue Zuwanderung in Groß- und Schwarmstädte befeuert, die nationale und internationale Migration auf sich ziehen. Im Mittelpunkt der Stadtentwicklungspolitik im Klimawandel steht die Frage, ob die im Bestand vorhandenen Potentiale (Flächenkonversion, Nachverdichtung) ausreichen oder ob die Siedlungsfläche zu Lasten der Grün- und Freiräume ausgeweitet werden muss, falls dies stadtklimatisch verträglich realisiert werden kann. Stark wachsende Städte im globalen Maßstab stehen vor ungleich größeren Herausforderungen. Eine Begrenzung der weiter wachsenden Siedlungs- und Verkehrsflächen gehört zu den besonders strittigen Fragen der Stadt- und Regionalplanung auch im globalen Maßstab. Hier stellt sich die existentielle Frage, (i) welche Gebiete für eine Besiedlung vorgesehen werden, (ii) wie die essentiellen Frei- und Grünräume freigehalten werden, (iii) wie einerseits den Marktmechanismen der Bodenverwertung zugunsten des Gemeinwohls entgegengewirkt werden und (iv) andererseits Bauflächenpotentiale bei zu geringer Verdichtung und zu großer Siedlungsausdehnung aktiviert werden können.

Angesichts der auf globaler Ebene deutlichen Beschränkungen geplanter und gesteuerter Stadtentwicklung kommt auch der Herausforderung besondere Bedeutung zu, mit welchen Mechanismen der informellen Stadtentwicklung die Essentials klimagerechter Stadtentwicklung beigestellt werden können. Informelle Stadtentwicklung läuft entgegen der herrschenden Meinung keineswegs ungesteuert; es handelt sich nur nicht um die eigentlich legitimierten administrativ-politischen Muster der Stadtentwicklung, die die Entwicklung steuern, sondern um informell bodenwirtschaftlich kodierte Formen der Stadt- und Siedlungsentwicklung. Diese informelle Entwicklung für Fragen des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit zu öffnen ist essentiell, um Breitenwirkung in den wachsenden Ökonomien des globalen Südens zu erzielen. Wichtig ist dabei insbesondere, Korridore für öffentliche und Straßenverkehrsinfrastruktur offen und Flächen für soziale, Gesundheits- und Bildungsinfrastruktur, Grün- und Freiflächen und Entwässerung frei zu halten. Hier bedarf es eines geänderten Comments der Stadtentwicklung, der sich für große Teile wachsender Städte von umfassender Planung verabschieden und sich auf die Essentials der Ver- und Entsorgung und der klimarelevanten Infrastrukturen beschränken muss.

Auf der städtebaulichen und architektonischen Detailebene müssen auch in Deutschland die Aspekte der Klimaanpassung (z. B. Sonnenschutz / Verschattung / Speichermasse / Gebäudebegrünung / Dachgestaltung / Fassadenfarbe / Ausrichtung der Gebäude) berücksichtigt werden. Dies gilt alle Bau- und Nutzungsformen gleichermaßen. Im Einzelnen ist bei einer integrierten Stadtplanung mit Blick auf die klimatischen Erfordernisse u.a. zu beachten, dass für bereits stark erwärmte Bereiche innerhalb der Stadt die Überwärmung reduziert wird (z. B. durch Dachbegrünung, Entsiegelungsmaßnahmen, Baumpflanzungen, Wasserbaumaßnahmen, helle Oberflächen, etc.). Grünräume

leisten durch Schatten und Verdunstung auch für die angrenzende Bebauung einen zentralen Beitrag zur Klimaanpassung.

Zur Identifikation und Koordination von Maßnahmen empfiehlt sich, Klimaschutzpläne / Stadtklimaanalysen zu erstellen. Gleiches gilt für Starkregenrisikokarten als Grundlage für klimarelevante Stadtentwicklung/-planung und zur Schaffung wassersensibler blauer, grauer und grüner Infrastruktur auf kommunaler Ebene. Dies enthebt Eigentümer, Unternehmen und öffentliche Hände jedoch nicht davon, Vorkehrungen für den maßnahmenbezogenem Objektschutz zu treffen.

Im gesamten Stadtgebiet müssen die zur Belüftung der Innenstadt relevanten Kaltluftschneisen ermittelt, erhalten und in ihrer Funktionsfähigkeit entwickelt und verbessert werden. Bei künftigen Bebauungen müssen die Gebäude so ausgerichtet werden, dass die Kaltluftschneisen in die Kernstadt hineinwirken können. Bei der Beachtung der lokalen Klimaverhältnisse (Kalt- und Frischluftsysteme) müssen auch deren regionale Verknüpfungen berücksichtigt werden, da die Einzugsgebiete dieser Luftsysteme zumeist weit über das Stadtgebiet hinausreichen.

Der Hoch- und Grundwasserschutz muss im Sinne einer intelligenten Resilienzstrategie stärker als bisher berücksichtigt werden, damit die weitere Entwicklung der Stadt nicht durch zunehmenden Funktionsverlust der städtischen Infrastrukturen (z. B. in Folge von Hochwasserschäden oder Grundwasserproblemen) behindert wird. Dies bedeutet nicht zwingend den Aus- und Aufbau teurer technischer Bauwerke, um Resilienzkriterien zu entsprechen. Vielmehr empfiehlt sich mit Blick z. B. auf Überschwemmungsereignisse eher, adaptive Infrastrukturen zu errichten, die ein temporäres Zurückweichen und eine folgende Reparatur und Wiederinbesitznahme ermöglichen. Dennoch müssen in der Stadtentwicklung zukünftig der Flächenbedarf für Einrichtungen zur Niederschlagsversickerung und für Retentionsflächen (Starkregenereignisse) berücksichtigt werden.

Als Vorsorge und zur Risikominimierung sollten zudem multifunktionale Grün- und Freiflächen entwickelt werden, die für eine temporäre Überschwemmung geeignet sind. Freiflächen sollten möglichst freigehalten werden und keine Unterbauung durch Tiefgaragen und weitere unterirdische Bauwerke aufweisen.

Im Zusammenhang mit der Herausbildung und Abgrenzung von Belastungsgebieten durch Wärmeinselbildung in den Städten müssen vorhandene und geplante Infrastruktureinrichtungen für besondere Risikogruppen (z. B. Krankenhäuser, Alteneinrichtungen usw.) auf besondere Schutzmaßnahmen und auf räumliche und bauliche Vorkehrungen überprüft werden. Im Einzelfall sollte ggf. auch eine Verlagerung von Standorten in Erwägung gezogen werden.

Grundsätzlich muss die Vorbildrolle der Stadt sich auch auf die weniger prominenten Themen wie Regenwasserbewirtschaftung und Überflutungsschutz beziehen. Diese kostenintensiven aber nicht sonderlich populären Themen müssen in der Stadt- und Regionalplanung, der Straßen- und Brückenplanung sowie der Hochbauplanung deutlich mehr Berücksichtigung finden.

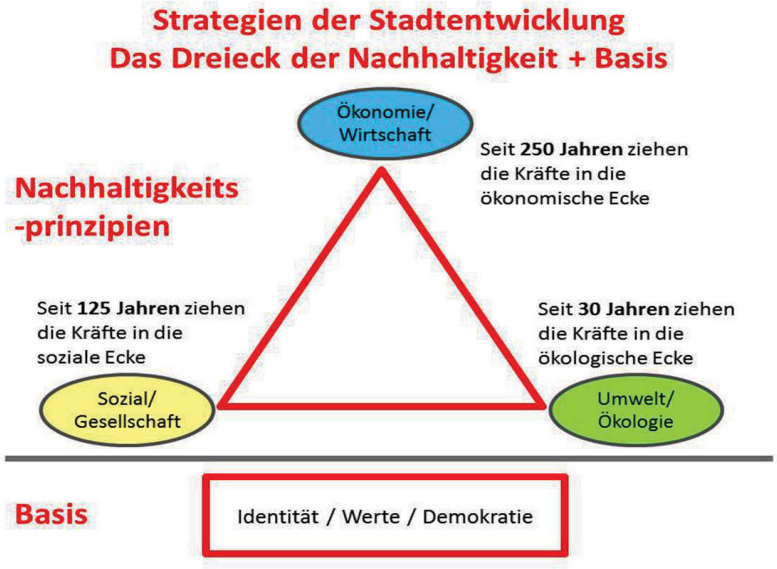


Abb. 1.6-4: *Erweiterung des Nachhaltigkeitsdreiecks Quelle: Stadtplanungsamt Erlangen, eigene Ergänzungen*

Von der Nachhaltigkeits- zur Suffizienzstrategie?

Das Nachhaltigkeitsdreieck ist seit Mitte der 1990er Jahre befördert durch die Publikation der Grenzen des Wachstums 1972 und der ersten Rio-Konferenz 1992 viel bemüht worden. Es dient inzwischen so gut wie allen Produkten als Legitimation ihrer Existenz – alles ist nachhaltig, alles wähnt sich im Gleichgewicht von wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Belangen. Dabei wird schnell übersehen, dass das Nachhaltigkeitsdreieck längst komplett aus dem Gleichgewicht geraten ist und eine gleichgewichtige Behandlung der Belange wenig geeignet erscheint, es wieder ins Gleichgewicht zu bringen. 250 Jahre lang hat die Marktwirtschaft an der wirtschaftlichen Ecke des Dreiecks gezogen. Das hat genauso Wirkung gezeitigt, wie 125 Jahre des Ziehens der Vertreter der Belange des Sozialwesens an der sozialen Ecke des Dreiecks. Beide standen seit Menschengedenken über den ökologischen, Umwelt- und ohnehin über den Klimaschutzbelangen. An diesen zieht die Wissenschaft zwar bereits seit Alexander von Humboldts Zeiten; halbwegs wirksam aber ist die Hinwendung auf die ökologischen Belange aber erst in den letzten 30 Jahren geworden. Und erst mit den letzten alarmierenden Feststellungen des IPCC beginnt sich tatsächlich auch politisches Handeln entschiedener zu bewegen.

Angesichts der Feststellung des IPCC (2018), dass der Verbrauch des weltweiten CO_2-Kontingents so schnell fortschreitet, dass der Ausstoß von Treibhausgasen bis 2050 Null erreichen muss, stellt sich daher die simple Frage: Muss nicht mit überproportionaler Anstrengung in den nächsten Dekaden am ökologischen Winkel des Nachhaltigkeitsdreiecks gezogen werden, um es überhaupt halbwegs wieder gegenüber den bislang übergewichteten Belangen ins Gleichgewicht zu bringen? Oder bedarf es eines anderen Leitbilds, weil naheliegender Weise weder die wirtschaftlichen noch die sozialen Belange ins Hintertreffen geraten dürfen, auch wenn die ökologischen Belange überproportional stärker betont werden sollen?

Hier drängt sich, wenngleich von der Stadtplanungsforschung und -praxis keineswegs eingeladen, das vermeintliche Leitbild der »*Smart City*« in die Diskussion. Abgesehen davon, dass es sich eher um einen Marketingbegriff der anbietenden Industrie- und Dienstleistungsunternehmen handelt, der zudem durch wenig angepasste »*one fits all-Lösungen*« an Reputation eingebüßt hat, bedarf es einer grundlegenden Richtigstellung: *Smart City*-Anwendungen befassen sich in erster Linie mit einem Teilbereich der integrierten, nachhaltigen Stadtentwicklung, nämlich der Anwendung digital basierter Techniken zur Hebung von Synergien und Schaffung von Systemlösungen. Das ist ein wichtiger Beitrag, rechtfertigt aber keineswegs den Ersatz des inzwischen in der Praxis weithin angewandten inhaltlichen und methodischen Ansatzes der integrierten Stadtentwicklung. Das hat auch das BMUB (2016) in seiner »*Smart City Charta*« zutreffend festgestellt. Vielmehr geht es bei der Verfolgung von *Smart Cities*-Ansätzen darum, (i) das implizite Wissen der Stadt und ihrer Bevölkerung zu heben (»*tacit knowledge*«, Schneidewind (2013)), (ii) die wichtigsten Projekte zu identifizieren und richtigen Prioritäten für ihre Durchführung zu setzen und dann (iii) womöglich auch *Smart Cities*-Ansätze zu ihrer Durchführung heranzuziehen.

Eine Lösung für das Dilemma, das Nachhaltigkeitsdreieck ins Gleichgewicht zu bringen, eröffnet womöglich die Suffizienzstrategie. Sie hat das Potential, die Nachhaltigkeitsstrategie wirksam zu ergänzen. Sie besteht, ähnlich dem Nachhaltigkeitsdreieck, aus drei Faktoren – Effizienz, Konsistenz und der Suffizienz selber. Die Effizienz richtet sich auf eine ergiebigere Nutzung von Materie und Energie, also auf die Produktivität von Ressourcen. Die Konsistenz richtet sich auf naturverträgliche Technologien, welche die Stoffe und die Leistungen der Ökosysteme nutzen ohne sie zu zerstören. Die Suffizienz schließlich richtet sich auf einen geringeren Ressourcenverbrauch durch eine Verringerung der Nachfrage nach Gütern. Das Modell mündet damit in einem praxisgerechteren und ehrlicheren Verständnis der Nachhaltigkeit: Ressourcen schonen, anders produzieren und verteilen und weniger verbrauchen.

Für eine klimagerechte und suffiziente Stadtentwicklung gibt es keine Blaupause. Lösungen müssen sich dem Ort, der Topographie, dem herrschenden Klima und den absehbaren Veränderungen, existierenden und entwickelbaren Infrastrukturen, den jeweiligen Strukturen von Government und Mustern der staatlichen und städtischen Governance und nicht zuletzt den wirtschaftlichen und finanziellen Verhältnissen anpassen. Dennoch besteht die Chance wie die Notwendigkeit, diesen Transformationsprozess zugunsten von Ressourcenschutz, fortdauernden wenngleich geänderten Produktionsmustern und sich wandelndem Konsumverhalten eher in den gesellschaftlichen Mainstream überführen zu können, als ein inzwischen deutlich verfälschtes Verständnis von Nachhaltigkeit. Dem Klimaschutz und der Klimaanpassung zumindest wäre mit einem auf dem Suffizienzprinzip basierenden Verständnis von Nachhaltigkeit in Deutschland, Europa und der Welt fraglos mehr gedient.

Literatur

ASSMANN D., J. HONOLD, B. GRABOW & J. ROOS (2018): SDG-Indikatoren für Kommunen – Indikatoren zur Abbildung der Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen in deutschen Kommunen. Hrsg. Bertelsmann Stiftung, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Deutscher Landkreistag, Deutscher Städtetag, Deutscher Städte- und Gemeindebund, Deutsches Institut für Urbanistik, Engagement Global. Gütersloh. *http://www.staedtetag.de/fachinformationen/stadtentwicklung/086266/index.html* .

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (2018): Klimaresilienter Stadtumbau, Bilanz und Transfer von StadtKlimaExWoSt. Berlin, *https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/Sonderveroeffentlichungen/2017/klimaresilienter-stadtumbau.html.*

BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2016): Smart City Charta, Digitale Transformation in den Kommunen nachhaltig gestalten, Bonn / Berlin.

BMU (Bundesministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit) (2017): Projektliste 100 % Klimaschutz, Berlin. *https://www.klimaschutz.de/projektliste?search_api_views_fulltext=&field_project_support_program=110&field_base_date_duration_value2%5Bdate%5D=&field_base_date_duration_value%5Bdate%5D=.*

DIFU (Deutsches Institut für Urbanistik) (2015), Klimaschutz & Klimaanpassung, Wie begegnen Kommunen dem Klimawandel? Beispiele aus der kommunalen Praxis, Köln. *https://difu.de/publikationen/2015/klimaschutz-klimaanpassung.html.*

DIFU (Deutsches Institut für Urbanistik) (2018): Praxisratgeber Klimagerechtes Bauen,Mehr Sicherheit und Wohnqualität bei Neubau und Sanierung. *www.difu.de/11177.*

DST (Deutscher Städtetag) (2015): Integrierte Stadtentwicklungsplanung und Stadtentwicklungsmanagement, Berlin. *http://www.staedtetag.de/fachinformationen/stadtentwicklung/076321/index.html.*

DST (Deutscher Städtetag) (2016): Planungspraxis deutscher Städte – Neue Materialien zur Planungskultur, Berlin. *http://www.staedtetag.de/fachinformationen/stadtentwicklung/077617/index.html.*

DST (Deutscher Städtetag) (2017): Neuausrichtung der Wohnungs- und Baulandpolitik, Berlin. *http://www.staedtetag.de/fachinformationen/stadtentwicklung/083228/index.html.*

DST (Deutscher Städtetag) (2018): Nachhaltige Mobilität für alle - Agenda für eine Verkehrswende aus kommunaler Sicht, Berlin. *http://www.staedtetag.de/fachinformationen/verkehr/085916/index.html.*

DST (Deutscher Städtetag) (2018): 51 Projekte: Planungspraxis kleiner und mittlerer Städte in Deutschland, Berlin. *http://www.staedtetag.de/fachinformationen/stadtentwicklung/087084/index.html.*

DST (Deutscher Städtetag) (2019): Anpassung an den Klimawandel in den Städten - Forderungen, Hinweise und Anregungen, Berlin, *http://www.staedtetag.de/fachinformationen/umwelt/088395/index.html.*

GEDIKLI, BAHAR (2018), Approaches to Climate Change in Spatial Planning and Design: International and Turkish Experiences, in: Middle East Technical University, Journal of the Faculty of Architecture, S. 89 ff, Ankara.

IPCC (2018): 1,5 °C GLOBALE ERWÄRMUNG, Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. *https://www.de-ipcc.de/256.php.*

MINISTERIUM FÜR BAUEN UND VERKEHR DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2008): Klimaschutz in der integrierten Stadtentwicklung, Handlungsleitfaden für Planerinnen und Planer, Düsseldorf. *https://broschueren.nordrheinwestfalendirekt.de/herunterladen/der/datei/klimaschutz-integrierte-stadtentwicklung-pdf/von/klimaschutz-in-der-integrierten-stadtentwicklung/vom/mhkbg/2561.*

STADT DORTMUND (2017): Schlussbericht Projekt »DAS: Klimafolgenanpassungskonzept für den Stadtbezirk Dortmund-Hörde«, Dortmund/Essen. *https://www.dortmund.de/media/p/umweltamt/downloads_umweltamt/klimafolgenanpassung/Endbericht_Klimaanpassung_Hoerde.pdf.*

SCHNEIDEWIND U. & H. SCHECK (2013): Die Stadt als »Reallabor« für Systeminnovationen. In: Rückert-John J. (eds): Soziale Innovation und Nachhaltigkeit. Innovation und Gesellschaft. Springer VS, Wiesbaden.

UBA (Umweltbundesamt) (2012), Klimaschutz in der räumlichen Planung, Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung, Dessau Roßlau. *https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4369.pdf.*

Alle Links zuletzt abgerufen am 5.10.2019

**Hilmar v. Lojewski ist seit 2012 Beigeordneter für Stadtentwicklung, Bauen, Wohnen und Verkehr für den Städtetag Nordrhein-Westfalen und den Deutschen Städtetag. Er studierte bis 1988 Raumplanung sowie Stadt- und Regionalplanung in Dortmund und Ankara, war bis 1991 Städtebaureferendar in Frankfurt/Main und bis 1994 für die GTZ als Planungsberater in Kathmandu, Nepal. Bis 2000 wirkte er als Abteilungsleiter im Stadtplanungsamt Dresden. In der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin war er für die Abteilungen Städtebau und Projekte und Ministerielle Angelegenheiten des Bauwesens zuständig. Von 2007 bis 2010 arbeitete er für die deutsche Entwicklungszusammenarbeit im Programm für Nachhaltige Stadtentwicklung in Syrien.*
Der Autor publiziert seine private Auffassung.

Kontakt:
Hilmar von Lojewski
Deutscher Städtetag
Hausvogteiplatz 1
10117 Berlin
hilmar.lojewski@staedtetag.de

Lojewski, Hilmar von (2019): Anforderungen an eine nachhaltige Stadt. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 53-61. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.08.

2. STADTKLIMA: UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Die Kenntnis der klimatischen Bedingungen in Städten ist nicht nur wegen des Klimawandels von Bedeutung, sondern auch für die Erhöhung der Wohnqualität im Stadtklima. Moderne Messmethoden und Modelle (Kap. 2.1) haben dazu geführt, dass die traditionellen meteorologischen Mess-Netze in Städten abgebaut und neue Methoden immer umfangreicher geworden sind. Diese und der Einsatz statistischer Methoden haben die Stadtklimatologie in den letzten zwanzig Jahren deutlich vorangebracht. Die Messung vom Satelliten (Kap. 2.2) und andere Fernerkundungsmethoden (Kap. 2.1) erlauben flächendeckende Aufnahmen von einigen Klimaparametern. Auch Nachbildungen von Städten und Stadtteilen in Windkanälen liefern wichtige Erkenntnisse vor allem der Lufttrömungsverhältnisse in Städten. Ein weiteres mittlerweile unverzichtbares Hilfsmittel für die Analyse des gegenwärtigen und zukünftigen Stadtklimas unter Berücksichtigung von Stadtentwicklung und Klimaänderung sind numerische Modelle. Sie errechnen Wind, Temperatur, Feuchte, Niederschläge und Luftbelastungen und können somit wesentliche Daten für die Stadtplanung liefern (Kap. 2.1).

2.1 Methoden zur Bestimmung stadtklimatischer Parameter und deren Belastbarkeit

K. Heinke Schlünzen, Frank Harms & Sarah Wiesner

Die für die Bestimmung stadtklimatischer Parameter wie Wind, Temperatur, Feuchte, Niederschlag und Luftbelastung geeigneten Messmethoden (in-situ, mobil, fernerkundet) und Modelltypen (statistisch, physikalisch, numerisch) werden in diesem Kapitel mit ihren Vor- und Nachteilen kurz vorgestellt. Ihre Eignung für die Bestimmung stadtklimatischer Parameter in Szenarien der Stadtentwicklung und des Klimawandels wird erläutert.

Methods for determining urban parameters and their suitability: *Measurement methods (in-situ, mobile, remote sensing) and types of models (statistical, physical, numerical) suitable for determining urban climate parameters such as wind, temperature, humidity, precipitation and air pollution concentration are briefly presented in this chapter, together with their advantages and disadvantages. Their suitability for determining urban climate parameters in scenarios of urban development and of climate change is explained.*

Die Besonderheiten des Stadtklimas können aus Messdaten abgeleitet oder modellierend erfasst werden. Welche Methode am besten geeignet ist, hängt ab von der notwendigen räumlichen und zeitlichen Auflösung, der notwendigen Zeit- und Flächenabdeckung und den zu bestimmenden Parametern. Aussagen zum Stadtklima können sich auf Veränderungen der meteorologischen Parameter im gesamten Stadtgebiet beziehen, welche flächendeckend und eher stadtweit auftreten, oder lokale Phänomene beschreiben. Dabei können die Veränderungen im Boden, direkt an der Oberfläche, zwischen den Gebäuden und in den Luftschichten darüber, also auch oberhalb der Stadt zu finden sein. Verschiedene Methoden zur Bestimmung sind verfügbar, mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen, die hier kurz vorgestellt werden.

Messmethoden

Hier sind zu unterscheiden Messungen an einem bestimmten Standort (*in-situ* Messung), mobile Messungen und Fernerkundungsverfahren, bei denen die Messung nicht direkt im zu untersuchenden Raum erfolgt, sondern indirekt aus z.B. der Intensität reflektierten Lichtes abgeleitet wird.

In-Situ-Messungen

Hierunter werden Messungen an festen Standorten verstanden, die über das Stadtgebiet verteilt sind. Sie sind beispielsweise darauf ausgelegt, Temperatur und Wind zu erfassen (z.B. Messnetz des Deutschen Wetterdienstes[1], DWD), Austausche zwischen Boden und Atmosphäre zu ermitteln (z.B. HUSCO Messnetz des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg[2], *Abb. 2.1-1*) oder die Luftqualität zu bestimmen (Luftmessnetze der Städte, der Länder und des Bundes[3]). Für die Entwässerung zuständige Institutionen messen häufig Niederschläge, um die Belastung der Entwässerungsinfrastruktur vorhersagen zu können. Die genannten Messstationen liefern durch regelmäßige Qualitätsprüfung nach internationa-

[1] *https://www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/messnetz_node.html. aufgerufen am 29.10.2019.*
[2] *https://wetterstationen.uni-hamburg.de/ (aufgerufen 29.10.2019).*
[3] *https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/messenbeobachtenueberwachen/luftmessnetze-der-bundeslaender (aufgerufen am 29.10.2019.*

len Vorgaben belastbare Messwerte. Allerdings ist die Messdichte aus Kostengründen gering, so gibt es z.B. in Hamburg nur 2 DWD Stationen, vor 10 Jahren waren es noch 9 (Schlünzen et al. 2010). Teilweise ersetzt werden sie durch Fernerkundungsverfahren und individuelle Messnetze wie HUSCO (10 Stationen).

Die relativ geringe Messdichte erlaubt grob die meteorologischen Parameter in der gesamten Stadt und ihrem Umland mit ihren langzeitlichen Änderungen zu erfassen, gibt aber keine Einblicke in die Details beispielsweise zwischen den Gebäuden. Die Messungen dort sind aufgrund der geringen räumlichen und zeitlichen Repräsentativität besonders anspruchsvoll und erfordern ein sehr dichtes Messnetz. Bürgermessnetze könnten hier helfen (z.B. OK Lab Stuttgart[4]), doch sind hier noch weitere Schritte notwendig, um belastbare Datensätze zu erhalten. So sind z.B. genauer Standort, Güte der Daten oder Gerätewartung unklar.

Mobile Messungen

Nicht standortgebundene Messungen werden für belastbare Aussagen nach standardisierten Vorgaben erhoben (z.B. VDI 2011). Meist werden Fahrzeuge verwendet, um die Geräte zu tragen, wodurch lokale Besonderheiten leichter als mit fest installierten Messgeräten erfasst werden können. Allerdings erfolgen die Messungen nicht zeitgleich, so dass zeitliche Änderungen in der Meteorologie (z.B. Tagesgang der Temperatur, Tiefdruckgebiete) oder andere Randbedingungen (z.B. Tagesgang der Emission von Stoffen) die gemessenen Unterschiede maßgeblich mitprägen können. Sie lassen sich dann nicht sicher auf lokale Effekte zurückführen.



Abb. 2.1-1: *HUSCO Messstation in der HafenCity Hamburg, Parkplatzstandort zwischen dicht stehenden mehrstöckigen Gebäuden (Foto: Sarah Wiesner).*

Fernerkundungsverfahren

Ausgewählte Größen können vom Satelliten aus bestimmt werden (z.B. Oberflächentemperaturen, s. Kap. 2.2. Bechtel et al. - in diesem Band). Inzwischen können hieraus auch klimatische Bedingungen abgeleitet werden, mit der Einschränkung, dass das Verfahren nur bei wolkenfreiem Himmel angewendet werden kann und somit tagsüber die klimatisch mittleren Temperaturen eher überschätzt und nachts unterschätzt werden.

Aus Radardaten abgeleitete Niederschlagsdaten werden seit einiger Zeit standardmäßig mit 1 km Auflösung und 5-minutiger Aktualisierung veröffentlicht (DWD[5]). Diese Daten zeigen im Gegensatz zum *in-situ* Messnetz auch kleinräumige Unterschiede und sind damit für kurzfristige Vorhersagen gut geeignet. Sie zeigen auch Heterogenitäten über Stadtgebieten an, wie dies Daten des noch höher aufgelösten Radars der Universität Hamburg für einen Tornado verdeutlichen (Hoffmann et al. 2018).

Modellierungsmethoden

Unter Modellierung ist die vereinfachte Nachbildung der Realität unter Einhaltung physikalischer Grundprinzipien zu verstehen. Insbesondere werden die Massen-, Impuls- und Energieerhaltung beachtet. Dies bedeutet beispielsweise in Modellen, dass sie bei Untersuchungen zum Einfluss von Photovoltaikanlagen (Windkraftanlagen) auf das Stadtklima die Veränderung der Energiebilanz an der Oberfläche (Impulsbilanz in der Atmosphäre) berücksichtigen müssen. Neben statistischen Modellen werden physikalische und numerische Modelle eingesetzt. Für größere Gebiete und weniger detaillierte Aussagen haben sich dabei die Stadtstruktur nur im Effekt berücksichtigende numerische Modelle bewährt, während für Aussagen zwischen Gebäuden die Stadtstruktur auflösende Modelle erforderlich sind.

Statistische Modelle

Sie untersuchen anhand statistischer Methoden den Zusammenhang von z.B. Wetterlagen und deren lokaler Ausprägung. Insbesondere werden sie für Niederschlagsbemessungen eingesetzt (100 Jahres Ereignis

[4] *https://deutschland.maps.luftdaten.info/#6/51.165/10.455 (aufgerufen am 29.10.2019.*

[5] *https://www.dwd.de/DE/leistungen/radarbild_film/radarbild_film.html (aufgerufen am 29-10-2019.*

– Bemessungsniederschlag; z.B. Weilguni 2019), aber auch für die Einschätzung der Intensität der städtischen Wärmeinsel im heutigen und im Zukunftsklima (z.B. Hoffmann et al. 2012). Statistische Modelle benötigen relativ wenig Rechenzeit und Speicherplatz im Computer und sind auf viele verschiedene Klimaprojektionen leicht anwendbar. Sie benötigen als Eingabegrößen aber Messdaten zum Aufbau der Statistik, gelten also streng genommen nur an den jeweiligen Messorten. Damit sind sie ungeeignet für Szenarien, in denen die Stadt- oder Raumentwicklung eine Rolle spielt. Zudem müssen die zukünftigen Wettersituationen in der Vergangenheit aufgetreten sein, um belastbare Werte insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Extreme zu erhalten.

Physikalische Modellierung

In einem physikalischen Modell werden die atmosphärischen Gegebenheiten und die Hinderniseffekte physikalisch übertragbar nachgebildet, wenn entsprechende Vorgaben eingehalten werden (VDI 2000). Bewährt haben sich Windkanäle insbesondere für Untersuchungen der Windfelder und von Luftbelastungen. In Windkanälen können Stadtgebiete von etwa 10 km² betrachtet werden (*Abb. 2.1-2*). Die meist berührungsfrei gemessenen Daten weisen eine hohe zeitliche (Bruchteile von Sekunden) und räumliche Auflösung auf und Details der Gebäude (z.B. Balkone, Vorsprünge, Brücken) lassen sich so wiedergeben, dass sie das Strömungsfeld und Ausbreitungsvorgänge realitätsnahe beeinflussen. Allerdings können stabile Schichtungen sowie instationäre Wetterlagen nur schwer modelliert werden.

Windkanäle ermöglichen es mittlere Randbedingungen (Windrichtung und Windgeschwindigkeit) zu kontrollieren. Messergebnisse werden so nicht durch wechselnde Wetterbedingungen beeinflusst. Hierdurch lassen sich über die Wahl hinreichend langer Messzeiträume statistisch repräsentative Ergebnisse ermitteln. Eine Zeitserie lässt sich über die Aneinanderreihung der Einzelereignisse erstellen und erfordert statistische Methoden, ähnlich der Methode der statistisch-dynamischen Verfeinerung von Klimamodellergebnissen (Hoffmann et al. 2016).

Numerische Modellierung – Stadtstruktur-auflösend

In einem numerischen Modell werden die realen Gegebenheiten im Computer durch numerische Lösung der Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und Energie errechnet. Werden die Stadtstrukturen wie Gebäude und Bäume aufgelöst berücksichtigt, so lassen sich die meteorologischen Parameter sowie Konzentrationswerte zwischen Gebäuden (*Abb. 2.1-3*), unter Bäumen, Brücken usw. in Auflösungen von Metern simulieren. Auch Niederschläge, chemische Umsetzungen, Tagesgänge der Temperatur unter Einschluss der Wärmespeicherung in Gebäuden und im Boden oder Interaktionen mit regionalen Strömungsfeldern (z.B. Kaltluftabflüsse) lassen sich errechnen. Allerdings: Je feiner die Auflösung ist, desto mehr Computerzeit wird notwendig; bei doppelter Auflösung in alle drei Raumrichtungen erhöht sich die Rechenzeit fast um das 20-fache. Würden durchgehende Klimasimulationen wie für die globalen Klimaänderungen mit einem derartigen Modell für eine Stadt durchgeführt, so betrüge für eine einzige durchgehende Stadtklimarechnung die Wartezeit auf die Ergebnisse einige Jahrzehnte. Daher lässt sich das Stadtklima nicht kontinuierlich, sondern nur statistisch-dynamisch ermitteln. Eine kontinuierliche zeitliche Entwicklung wie für globale Klimamodellrechnungen ist dann anlog zu den physikalischen Modellen nur als konstruierte Zeitreihe möglich.

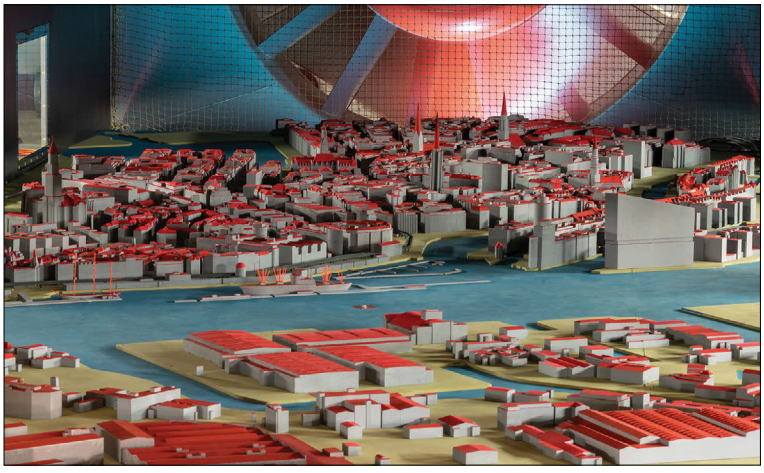


Abb. 2.1-2: *Physikalisches Modell im Windkanal des Meteorlogischen Instituts der Universität Hamburg (Bild: Windkanallabor EWTL. Bernd Leitl, Universität Hamburg).*

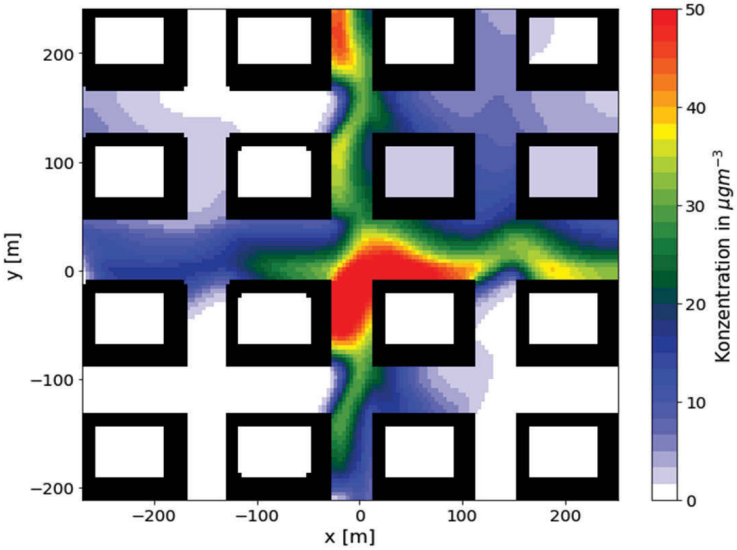


Abb. 2.1-3: *Mit dem Gebäudeauflösenden Modell MITRAS simulierte Konzentrationen (in µg m³) in 1 m über Grund für den 21.12. um 6:40 LST im Bereich einer Blockrandbebauung. Die Emissionen erfolgen auf der 4-spurigen Straße in der Mittel des Modellgebietes (von West nach Ost) und auf der 2-spurigen Straße in der Mittel des Modellgebietes von Süd nach Nord (aus Voss 2019).*

Numerische Modellierung – Effekte der Stadtstruktur berücksichtigend

Auch dieser Modelltyp löst die Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und Energie auf einem Computer. Die Einflüsse der Stadtstrukturen auf meteorologische Größen werden dabei nur in ihrem Effekt berücksichtigt. Die Modellauflösung beträgt zwischen 100 m und 1 km, so dass eine Stadt großräumig dargestellt ist. Die veränderten Bodenmaterialien und Rauigkeitseffekte können berücksichtigt werden, nicht aber Details. Dadurch sind Lösungen eher für die Luftschichten über der Stadt geeignet als für einzelne Stadtteile oder gar zwischen Gebäuden. Die Modelle können gut ein Bild der generellen Verteilung der städtischen Wärmeinsel, von ihrem Tagesgang, den veränderten Feuchtefeldern, Kaltluftabflüssen und Interaktionen mit der Umgebung geben.

Stadtklimatische Langezeituntersuchungen können mit Modellen, die Effekte der Stadtstruktur berücksichtigen, über statistisch-dynamische Verfeinerung (Hoffmann et al. 2016) oder über kontinuierliche Integration erzeugt werden. Im zweiten Fall ist der Rechenzeitaufwand aber noch immer erheblich, so dass nur wenige Szenarien (z.B. zur Stadtentwicklung) gerechnet werden können. Daher ist für viele Fälle zur Untersuchung des Stadtklimas der statistisch-dynamische Ansatz der geeignetere.

Literatur

HOFFMANN P., C. MERKER, K LENGFELD & F. AMENT (2018): The Hamburg Tornado (7 June 2016) from the perspective of low-cost high-resolution radar data and weather forecast model. Atmospheric Research, 211, 1-11. *https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.009.*

HOFFMANN P., SCHOETTER R., SCHLÜNZEN K.H. (2016): Statistical-dynamical downscaling of the urban heat island in Hamburg, Germany. Meteorologische Zeitschrift, PrePub DOI 10.1127/metz/2016/0773.

HOFFMANN P., O. KRUEGER & K. H., SCHLÜNZEN (2012): A statistical model for the urban heat island and its application to a climate change scenario. Int. J. Climatol., 32: 1238-1248, doi: 10.1002/joc.2348.

SCHLÜNZEN K. H., P. HOFFMANN, G. ROSENHAGEN & W. RIECKE (2010): Long-Term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. International Journal of Climatology, 30:1121-1136, DOI 10.1002/joc.1968.

VDI (2011): Richtlinie 3785 Blatt 2 - Methoden bodengebundener Stadt- und Standortklimamessungen mit mobilen Messsystemen. Beuth Verlag, Berlin.

VDI (2000): Richtlinie VDI 3783 Blatt 12 – Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht – Windkanalanwendungen. Beuth Verlag, Berlin.

VOSS V. (2019): Bestimmung der Repräsentativität von Konzentrationswerten mit Hilfe hindernisauflösender Modellierung. Masterarbeit Meteorologie, Universität Hamburg.

WEILGUNI V. (2019): Vom Messwert zum Bemessungsniederschlag – ein Service der Hydrographie Österreichs. Österr Wasser- und Abfallw., 71: 36. *https://doi.org/10.1007/s00506-018-0539-8.*

Kontakt

Prof. Dr. K. Heinke Schlünzen
Dr. Frank Harms
Dr. Sarah Wiesner
Meteorologisches Institut, CEN - Universität Hamburg
heinke.schluenzen@uni-hamburg.de

Schlünzen K. H., F. Harms & S. Wiesner (2019): Methoden zur Bestimmung stadtklimatischer Parameter und deren Belastbarkeit. In: Lozán, J. L. S.-W. Breckle, H. Graßl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 62-65. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.09.

2.2 Einsatz von Satelliten zur Analyse des Stadtklimas

Benjamin Bechtel, Susanne A. Benz & Andreas Wicki

Die Entwicklung der satellitenbasierten Fernerkundung hat zu unserem Verständnis des Stadtklimas beigetragen und die Möglichkeiten zur flächendeckenden Erfassung revolutioniert. Dabei werden insbesondere zwei Arten von Satellitendaten verwendet. Zum einen können Oberflächentemperaturen und somit die städtische Oberflächenwärmeinsel mit thermaler Fernerkundung direkt vermessen werden. Zum anderen werden multispektrale Satellitenbilder und aktive LIDAR-Daten zur Charakterisierung der Stadtstruktur in verschiedenen Skalen genutzt. Diese Daten bieten relevante Informationen zur Modellierung des Stadtklimas.

***Using Satellites to Analyse the Urban Climate**. The development of satellite based Earth Observation contributed to our understanding of urban climate and revolutionized the possibilities of large scale monitoring. Particularly two types of satellite data are used. Firstly, thermal infrared (TIR) sensors allow the direct observation of surface temperatures and therefore surface urban heat islands. Secondly, multispectral satellite images and active LIDAR sensors are used to observe the characteristics of urban surfaces at different scales. These data provide crucial information for urban climate models.*

Stadtklimatologische Studien zeichnen sich durch eine große Methodenvielfalt aus, wobei die Ansätze sich gegenseitig ergänzen und gemeinsam zu unserem Verständnis beitragen (Oke et al. 2017). Oft geht es dabei darum die spezifischen urbanen Effekte zu isolieren, weshalb andere Effekte ausgeblendet und kontrolliert werden müssen. Grundlegend können zwei Methodenkomplexe voneinander abgegrenzt werden: Beobachtung und Modellierung. Letztere zeichnet sich durch eine simplifizierte Repräsentation der urbanen Oberfläche in einem Miniaturmodell (physikalische Modellierung) oder im Computer (numerische Modellierung) (s. Kap. 2.1 Schlünzen et al. - in diesem Band) aus.

Modelle sind geeignet das Prozessverständnis zu fördern und Szenarien experimentell zu untersuchen. Sie geben in der Regel aufgelöste Informationen über die gesamte Domäne und können vergleichsweise leicht wiederholt und modifiziert werden. Gleichzeitig stellen Modelle nur eine Annäherung an die Realität dar und benötigen daher stets einer Evaluation sowie einer kritischen Betrachtung, ob sie für den jeweiligen Untersuchungszweck geeignet sind.

Beobachtungen sind dagegen näher an der Realität, haben jedoch zwangsläufig Messfehler und sind stets exemplarisch und lückenhaft. Für Messungen stehen eine große Anzahl unterschiedlicher Sensoren zur Verfügung, die in der Regel auf verschiedenen Plattformen (z.B. Stativ, Mast, Kran, Automobil, Fahrrad, Ballon) montiert sind, und die Atmosphäre unmittelbar vor Ort (= *in-situ*) beproben können. Diese Messungen können dabei fest installiert (= stationär) oder bewegt (= mobil) sein. Messnetze in Städten unterscheiden sich dabei von offiziellen meteorologischen Messstationen nach WMO-Standard, da Kriterien wie 2 m Messhöhe, Rasenfläche oder großer Abstand zu Gebäuden für die Stadt nicht repräsentativ sind und auch oft nicht eingehalten werden können. Häufig wird in Städten daher auf Messtürmen und/oder über Vertikalprofile gemessen, um der dreidimensionalen Stadtstruktur Rechnung zu tragen.

Neben den *in-situ*-Messungen kann ein gesamtes Stadtgebiet oder Teile davon aus der Ferne vermessen werden. Diese Technik nennt sich Fernerkundung und wird entweder von Satelliten oder erdnahen Flugobjekten wie Flugzeugen, Hubschraubern und zunehmend Drohnen betrieben. Es gibt dabei ebenfalls eine große Vielfalt von Verfahren, die sich in ihrer zeitlichen, spektralen und räumlichen Auflösung unterscheiden. Hier betrachten wir jedoch vorranging bildgebende Verfahren, die von der Erde reflektierte oder abgestrahlte (= emittierte) elektromagnetische Strahlung räumlich aufgelöst messen. Damit können Oberflächeneigenschaften wie bspw. die Albedo (Rückstrahlvermögen) oder die Oberflächentemperatur bestimmt werden. Die Vorteile der Fernerkundung im Vergleich zu *in-situ*-Messungen sind die große Flächenabdeckung und die Gleichzeitigkeit. Nachteile sind die fehlende Kontinuität bzw. notwendige Kompromisse zwischen räumlicher und zeitlicher Auflösung und störende atmosphärische Einflüsse (besonders bei Wolkenbedeckung). Die Kosten für die Satellitenfernerkundung sind hoch, viele Erdbeobachtungsdaten sind jedoch frei verfügbar. Im Folgenden werden exemplarisch zwei wichtige Anwendungen von Fernerkundung in der Stadtklimatologie skizziert: die Verwendung thermaler Fernerkundung zur Messung der städtischen Wärmeinsel und die Verwendung multispektraler Fernerkundung zur Charakterisierung der Stadtstruktur.

Fernerkundung der städtischen Wärmeinsel

Physikalische Prinzipien

Thermale (engl. *thermal infrared*, *TIR*) Fernerkundung beschreibt die bildgebende und kontaktlose Messung der Erdoberflächentemperatur und spielt eine besondere Rolle in der Stadtklimatologie. Diese Messungen werden typischerweise in bestimmten Wellenlängenbereichen (3-5 oder 8-14 µm) durchgeführt. In diesen

»atmosphärischen Fenstern« kann ein großer Teil der terrestrischen Wärmestrahlung die Atmosphäre passieren. Grundsätzlich bestimmen das Emissionsvermögen ε und die Temperatur einer Oberfläche, wie viel Energie sie emittiert. Das spektrale Emissionsvermögen entspricht dabei dem spektralen Absorptionsvermögen – gute Strahler sind also auch gute Absorber. Wärmere Körper emittieren kürzere Wellenlängen. Sehr heiße Strahler wie Schmiedeeisen oder Glühlampen können sogar vom menschlichem Auge wahrgenommen werden. Temperaturen außerhalb dieses Bereichs können nur mit Messtechnik beobachtet werden.

Unterschiedliche TIR-Fernerkundungssysteme

Für die thermale Betrachtung von Landoberflächen werden in der Fernerkundung üblicherweise Sensoren auf polumlaufenden Satelliten wie NOAA-AVHRR, Sentinel-3 (COPERNICUS), ASTER, MODIS (beide auf den Satelliten Terra und Aqua) oder Landsat (momentan aktiv: Landsat 7 und 8) verwendet. Diese Satelliten befinden sich ca. 600-800 km über der Erdoberfläche und sehen daher jeweils nur einen kleinen Ausschnitt. Aufgrund der regelmäßigen Verfügbarkeit und der Kontinuität der Missionen bieten sie aber die Möglichkeit Untersuchungen zu reproduzieren und Veränderungen zu überwachen.

Diese Systeme betrachten unterschiedlich breite Streifen der Erdoberfläche (= Schwadbreite). MODIS erlaubt vier Betrachtungen eines Ortes pro Tag in ca. 1 km räumlicher Auflösung. Aus der enormen Schwadbreite von 2.330 km (entspricht der Strecke von Barcelona bis Istanbul) resultieren jedoch sehr flache Betrachtungswinkel an den Rändern. Systeme mit hoher Auflösung von rund 100 m wie ASTER oder Landsat haben dagegen eine nahezu senkrechte Ansicht und können auch in heterogenen Städten eingesetzt werden. Der Nachteil ist dabei die lange Dauer zwischen zwei Überflügen von 16 Tagen.

Eine andere Möglichkeit zur *TIR*-Fernerkundung sind geostationäre Wettersatelliten wie GOES-E/W oder Meteosat, die in einer Höhe von rund 36.000 km scheinbar ortsfest über dem Äquator stehen. Sie verfügen bei einer hohen zeitlichen Auflösung nur über eine grobe räumliche Auflösung (1-5 km) und haben in mittleren und hohen Breiten einen flachen Einfallswinkel.

Oberflächenwärmeinsel

Seit *TIR*-Daten verfügbar sind, stehen Städte im Fokus des Interesses. Rao erforschte bereits 1972 die thermalen Eigenschaften der Städte an der US-Ostküste mit einer Auflösung von 7,4 km. Roth et al. (1989) nutzten den polumlaufenden amerikanischen Wettersatelliten NOAA-AVHRR, um die Oberflächentemperatur der Städte Vancouver, Seattle und Los Angeles zu untersuchen. Trotz der eher groben Auflösung von 1 km erkannten sie einen Zusammenhang der Oberflächentemperatur mit der Landnutzung: Industriegebiete waren typischerweise wärmer als bewachsene Flächen, Küstengebiete oder Flussläufe.

Beschaffenheit urbaner Oberflächentemperaturen

Oberflächen wandeln die ankommende Energie entsprechend ihrer thermischen Eigenschaften verschieden um und erwärmen sich dadurch unterschiedlich stark. Asphalt und Beton nehmen bspw. bei gleicher Einstrahlung mehr Energie auf als vegetationsbedeckte Oberflächen. Wasser fließt auf versiegelten Flächen ab statt zu verdunsten, wodurch weniger Energie als latente Wärme abtransportiert wird (vgl. Kap. 1.1 Kuttler - in diesem Band). Dadurch ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Oberflächentemperaturen einer Stadt und ihres Umlands, welcher als städtische Oberflächenwärmeinsel (engl. *surface urban heat island, SUHI*) bezeichnet wird.

Die feinskaligen Muster von Oberflächenwärmeinseln sind auf unterschiedliche Baumaterialien und die Bebauungsstruktur zurückzuführen. Helle Flächen mit hoher Albedo nehmen weniger Energie auf, entsprechend sind Hausfassaden in mediterranen Ländern oftmals weiß gestrichenen. Raue Oberflächen geben mehr Wärme an die Luft ab, glatte Oberflächen erwärmen sich hingegen stark. Zudem bestimmen Materialeigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme oder Wärmekapazität die Geschwindigkeit der Erwärmung sowie der Abkühlung. Die Temperatur einer Oberfläche ist dabei nicht mit der gespeicherten Energie gleichzusetzen. Eine sehr dünne Oberfläche erwärmt sich schnell, da sich die Energie auf ein kleines Volumen konzentriert. Auch bei einer Oberfläche mit geringer Wärmeleitfähigkeit wird wenig Energie an die unteren Schichten weitergegeben und sie erwärmt sich stark. Diese Oberflächen kühlen folglich in der Nacht relativ schnell aus, da sie nicht mit Energie aus dem Untergrund versorgt werden. Versiegelte Flächen mit einer hohen Wärmekapazität sind hingegen tagsüber nicht die heißesten Bereiche, bleiben jedoch nachts lange warm. Durch diese unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von künstlichen Oberflächen ergeben sich innerhalb des städtischen Raums ausgeprägte räumliche und zeitliche Muster der Oberflächentemperatur.

Die wärmsten Oberflächen einer Stadt sind tagsüber meist größere Industriekomplexe mit dünnen und oft metallischen Dächern sowie breite Gleisbetten.

Freie Dachflächen werden in der Regel nur wenig beschattet und sind der solaren Einstrahlung am stärksten ausgesetzt. Nach Sonnenuntergang können sie ungehindert ausstrahlen und somit abkühlen, was zu einer sehr großen Temperaturamplitude zwischen Tag und Nacht führt. Straßen weisen einen viel flacheren Tagesgang der Oberflächentemperatur auf, da sie tagsüber nicht den maximal möglichen Strahlungsinput erhalten und nachts durch umgebende Gebäude thermisch abgeschirmt werden (Oke et al. 2017). Gleiches gilt für das kleinteilige Stadtgefüge, welches sich typischerweise aus einer Vielzahl an Oberflächen und Formen zusammensetzt (*Abb. 2.2-1*). Die Umwandlung der Sonnenenergie ist dabei stark von der spezifischen städtischen Geometrie abhängig: in Richtung der Sonne orientierte Fassaden sowie Schrägdächer erwärmen sich stärker als schattige Nordwände.

Grenzen der urbanen TIR-Fernerkundung

Polumlaufende Satelliten mit hoher Auflösung geben ein vergleichsweise detailliertes Bild der Oberflächentemperaturen und thermalen Eigenschaften einer Stadt. Die meisten Gitterpunkte einer urbanen Satellitenaufnahme im *TIR*-Bereich setzen sich jedoch aus unterschiedlichen Oberflächen zusammen (Wicki & Parlow 2017). Ein weiteres Problem der *TIR*-Fernerkundung ist die Reduktion der Stadt auf eine zweidimensionale Fläche, die oft auch noch schräg gesehen wird (Mitraka & Chrysoulakis 2014). Die gemessene Oberflächentemperatur ist außerdem vor allem tagsüber stark richtungsabhängig (= anisotrop), da je nach Blickwinkel unterschiedliche Anteile von besonnten und schattigen Hauswänden, Dächern, Straßen etc. aufgenommen werden. Eine Stadt (auf der Nordhalbkugel) erscheint daher von Süden betrachtet wärmer als von Norden.

Unterflurwärmeinsel

Beschaffenheit urbaner Grundwassertemperaturen

Die Temperatur des Untergrunds nimmt in ungestörtem Zustand mit zunehmender Tiefe entsprechend des geothermischen Gradienten und geologischer Schichten zu (in Deutschland etwa 2,5 bis 3,5 K pro 100 m) (Agemar et al. 2012). Periodische Temperaturschwankungen sind nur nahe der Oberfläche erkennbar, mit zunehmender Tiefe schwächt sich die Amplitude ab und eine Phasen-

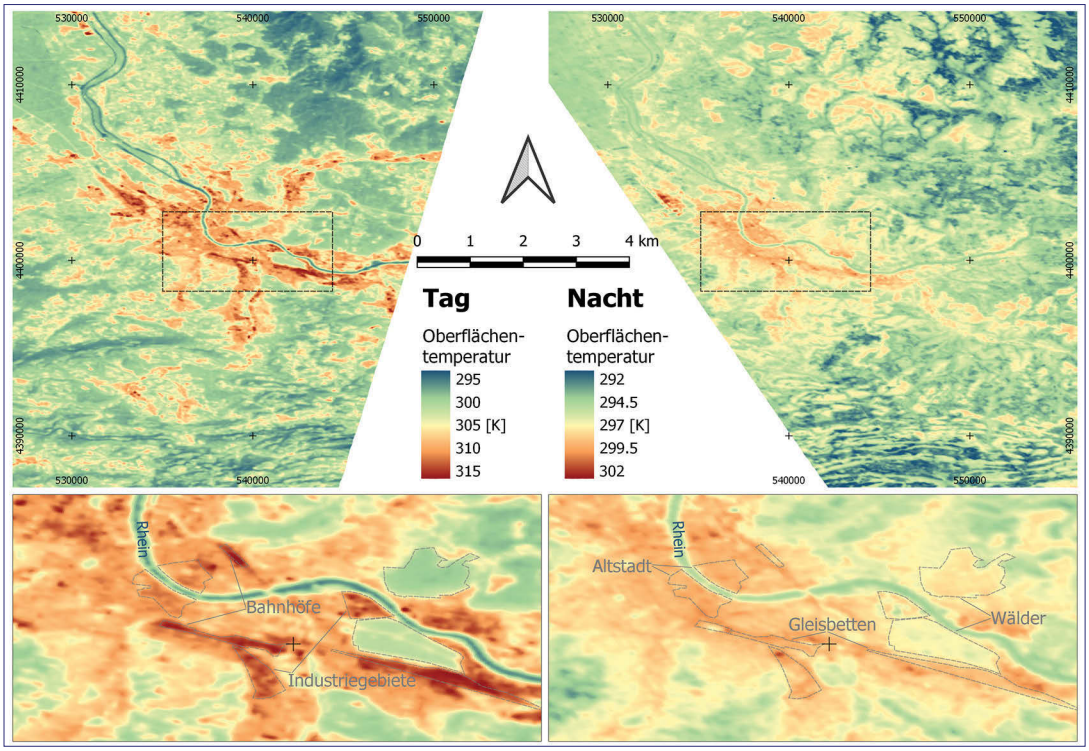


Abb.2.2-1: *Oberflächentemperaturen der Stadt Basel und ihres Umlands (oben) vom 29. Juni 2019 (12 Uhr, links) und 26. Juni 2019 (23 Uhr, rechts), aufgenommen von Landsat 8 während einer ausgeprägten Hitzewelle. Die unteren Detailausschnitte zeigen das unterschiedliche thermische Verhalten einzelner Oberflächen.*

verschiebung ist zu beobachten. Tageszeitliche Schwankungen sind oft schon ab wenigen cm Tiefe nicht mehr auszumachen, jahreszeitliche Schwankungen hingegen reichen bis in etwa 20 m Tiefe, abhängig von ihrer Stärke und der geologischen Zusammensetzung des Erdreichs. Daneben beeinflussen vertikaler und horizontaler Grundwasserfluss die Temperaturverteilung durch advektiven Wärmetransport. In Städten ist dieses Bild gestört. Temperaturen werden nicht allein von natürlichen Prozessen geprägt, sondern sind stark von anthropogenen Wärmequellen beeinflusst.

Dies führt zu einer Umkehrung des Tiefenprofils, in dem die Temperaturen nahe der Oberfläche deutlich erhöht sind (vgl. Taniguchi et al. 2005). Wie tief die Temperaturanomalie reicht, ist dabei neben Geologie und vertikalem Grundwasserfluss hauptsächlich vom Alter einer Stadt abhängig: Je älter die Stadt ist, desto tiefer reicht die Erwärmung. Bei horizontaler Betrachtung zeigen sich die sogenannten städtischen Wärmeinseln im Untergrund (engl. *subsurface urban heat islands*, *SubSUHI* in Kap. 1.1 *SUHI*). Temperaturen im Untergrund der Stadt sind meist deutlich höher als Temperaturen unter der ländlichen Umgebung, in deutschen Großstädten etwa um 1-3 K. Lokale Temperaturanomalien fallen jedoch deutlich höher aus – neben Tiefgaragen sind die Grundwassertemperaturen oft um mehr als 5 K erhöht (Tissen et al. 2019). Diese können die Wasserqualität beeinträchtigen und verringern den Nutzen von Grundwasser zur Kühlung – eine in der Industrie häufig verwendete Methode. Allerdings bietet die im Grundwasser gespeicherte Wärme auch eine Chance auf nachhaltige Energiegewinnung durch Wärmerecycling. Mithilfe von oberflächennahen Geothermieanlagen könnte die urbane Wärme genutzt werden, um den winterlichen Heizbedarfs von Wohngebäuden in einer Stadt nachhaltig zu decken.

Ursache der *SubSUHI* ist eine Vielzahl anthropogener Wärmeflüsse in den Untergrund, die u.a. von den erhöhten Oberflächentemperaturen (siehe oben), Gebäudekellern, Fernwärme- und Abwassernetzen sowie Straßen- und U-Bahntunneln verursacht werden. Besonders große Wärmeflussdichten erzeugen lokale Wärmequellen wie etwa Fernwärmeleitungen, die Wärmeflussdichte aus erhöhten Oberflächentemperaturen ist dagegen vergleichsweise gering: Im stadtweiten Durchschnitt und Jahresmittel fließen etwa 0,2 Watt pro Quadratmeter unbebauter Oberfläche in den Untergrund. In Grünanlagen und unter Rasenflächen wird Wärme dagegen nicht von der Oberfläche an das Grundwasser abgegeben, sondern das Grundwasser heizt die Oberfläche auf. Auf die gesamte Stadtfläche bezogen stammt dennoch ein Großteil der im Untergrund gespeicherten Wärmeenergie von Gebäuden und versiegelten Oberflächen und damit der Oberflächenwärmeinsel. Diese Wärmequellen erzeugen zwar einen kleinen Wärmefluss (pro Quadratmeter), in der Summe dominieren sie aber durch die hohe Anzahl an versiegelten und bebauten Flächen (Benz 2016).

Fernerkundung von Grundwassertemperaturen

Eines der größten Probleme bei der Erforschung der *SubSUHI* ist der Mangel an Messdaten. Die Temperatur des Untergrunds wird vorwiegend als Grundwassertemperatur bestimmt und in Brunnen gemessen. Die bestehende Infrastruktur ist hierbei oft unzureichend oder nur schwer zugänglich und Neubohrungen sind vor allem im komplexen Untergrund von Städten teuer. Aus diesem Grund werden Grundwassertemperaturen in der Praxis oft anhand von Oberflächentemperaturen abgeleitet. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten.

Zum einen können Temperaturtiefenprofile anhand von Oberflächentemperaturzeitreihen modelliert werden. Diese detaillierte Analyse des Tiefenprofils ist in Städten durch die Vielzahl an komplexen Wärmequellen erschwert. Nur wenn Geologie, Hydrogeologie, langjährige Oberflächentemperaturen, langjährige Landnutzung, sowie Temperaturen und Alter der Gebäude bekannt sind, können auch Temperaturen in urbanen Gebieten verlässlich modelliert werden (bspw. Rivera et al. 2015).

Zum anderen werden Grundwassertemperaturen flächendeckend mithilfe von Fernerkundung abgeschätzt. Nahe der Oberfläche kann der geothermische Gradient vernachlässigt werden und die Jahresdurchschnittstemperaturen gelten als tiefenunabhängig, d.h., dass in einem geschlossenen System Temperaturen an und unter der Oberfläche im Jahresmittel gleich sind. In einem offenen System sind Grundwassertemperaturen im Durchschnitt höher als durch *TIR*-erfasste Oberflächentemperaturen (*Abb. 2.2-2*). Der Offset beider Temperaturen wird im ländlichen Raum maßgeblich durch die Verdunstung (Evapotranspiration) und die Isolation des Untergrunds durch eine geschlossene Schneedecke bestimmt. Anhand dieses Zusammenhangs können globale Grundwassertemperaturen mit einem Fehler von 1,4 K bestimmt werden (Benz et al. 2017). In Städten ist zusätzlich der Einfluss der oben genannten anthropogenen Wärmeflüsse zu beachten. Dabei werden bisher kleinskalige Wärmequellen oft vernachlässigt und die *SubSUHI* wird anhand von *TIR*-Daten und Gebäudedichte sowie ggf. Evapotranspiration und Schnee (Benz 2016, Hemerle et al. 2019) abgeschätzt. Diese Modelle erreichen eine Genauigkeit von etwa 1 K und ergeben damit oft ein re-

alistischeres Bild der innerstädtischen Variabilität als die einfache Interpolation der gemessenen Grundwassertemperaturen (*Abb. 2.2-2*).

Wärmeinsel der Stadthindernisschicht

Städte generieren durch ihre dreidimensionale Struktur, den hohen Versiegelungsgrad und die geringe Zahl von Grünflächen ihr eigenes Mikroklima. Typischerweise weisen Städte nachts eine mehrere Grad Celsius höhere Lufttemperatur auf als ihre ländliche Umgebung – auch bekannt als städtische Wärmeinsel (engl. *urban heat island*, *UHI*). Diese ist innerhalb der Stadt sehr heterogen verteilt. Die nächtlichen Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Land können im Mittel über das ganze Jahr hinweg beobachtet werden. Ihre stärkste Ausprägung weisen sie während langanhaltender Hitzewellen mit wolkenlosen Nächten, ausgeprägtem Strahlungsinput am Tag und wenig Wind (vgl. Kap. 1.1 Kuttler - in diesem Band) auf.

Im Gegensatz zur Oberflächenwärmeinsel bildet sich die Wärmeinsel der Stadthindernisschicht (Luftschicht zwischen Boden und mittlerer Gebäudehöhe, engl. *canopy layer*) vorwiegend in der Nacht aus. Am Tag ist sie dagegen schwach ausgeprägt und verwandelt sich vereinzelt sogar in eine leichte Kälteinsel. Dies hat seine Ursache in den unterschiedlichen Energiebilanzen der urbanen und ruralen Umgebung (vgl. Kap. 1.1 Kuttler - in diesem Band).

Fernerkundung der Lufttemperatur

Aufgrund dieser komplexen Prozesse müsste für die Bestimmung der Lufttemperatur mittels Satellitendaten eigentlich die komplette Energiebilanz gelöst werden. Wie bereits bekannt, darf die Oberflächentemperatur einer Stadt keineswegs mit der Lufttemperatur gleichgesetzt werden, sondern kann bestenfalls als Indiz für die tagsüber gespeicherte Energie dienen.

Ein wichtiger Proxy für die *canopy layer UHI* ist die Morphologie der Stadt, also ihre dreidimensionale Form. Eine offene, versiegelte Fläche erwärmt sich bspw. tagsüber sehr stark, gibt die Wärme jedoch abends auch rasch wieder ab. Dagegen speichert eine dichte innerstädtische Umgebung die Energie durch die Abschirmung und Gegenstrahlung von Häuserfassaden sehr gut. In Gebieten mit einem hohen Grünflächenanteil wird tagsüber mehr Energie für die Verdunstung aufgewendet und damit weniger gespeichert. Es besteht also ein konkreter Zusammenhang zwischen städtischer

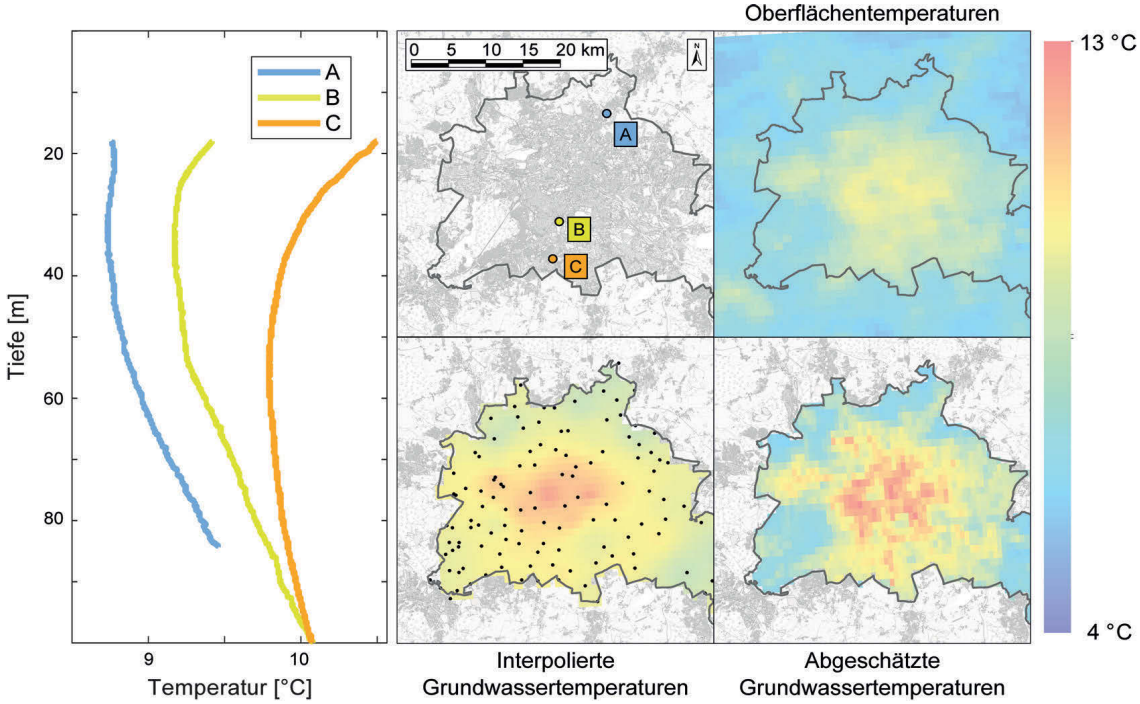


Abb.2.2-2: *Grundwassertemperaturen im Stadtgebiet Berlin. Gezeigt werden drei Tiefenprofile A, B und C, sowie mehrjährige Mittel der Oberflächentemperatur, interpolierte Grundwassertemperaturen (schwarze Punkte: Brunnen) und anhand von Oberflächentemperaturen, Gebäudedichte, Schneedecke und Evapotranspiration abgeschätzte Grundwassertemperaturen (nach Benz 2016, verändert).*

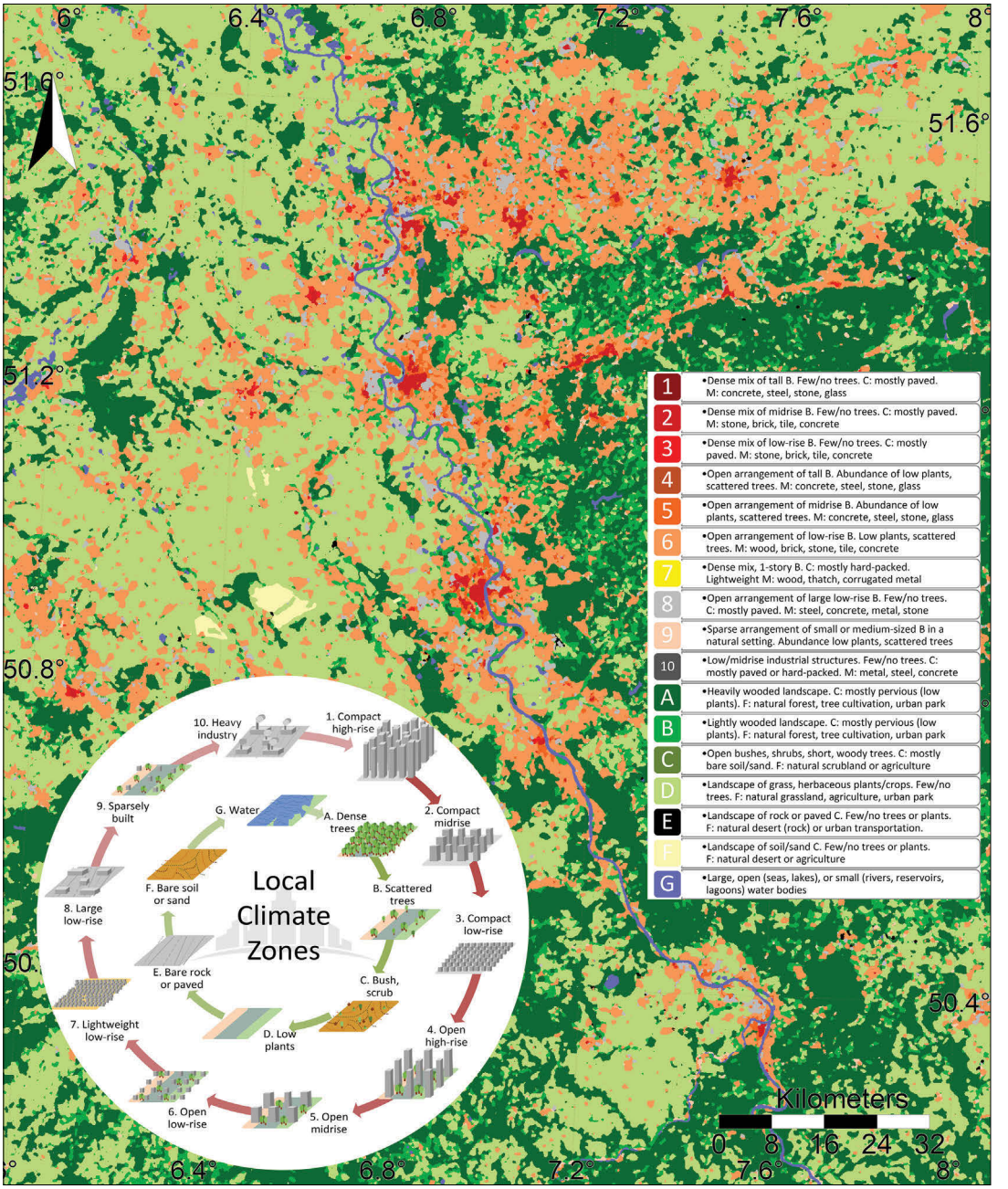


***Abb. 2.2-3**: Local Climate Zone (LCZ) Karte der Region Rhein-Ruhr. Städtische (1-10) und natürliche (A-G) LCZ-Typen und ihre Eigenschaften; B: Gebäude; C: Landbedeckung; M: Materialien; F: Funktion; nach* Bechtel *et al. (2017). Daten aus* Demuzere *et al. (2019), gefiltert.*

Bebauung und nächtlicher Temperaturverteilung (Wicki et al. 2018). Die Stadtstruktur wird dabei in Stadtklimamodellen durch Stadthindernisparameter (engl. *urban canopy parameters, UCP*) charakterisiert. Dazu gehören bspw. die Horizontüberhöhung oder Himmelssicht (engl. *sky view factor*), das Verhältnis von Höhe zu Breite einer Straßenschlucht, die komplette Oberfläche pro Grundeinheit, die Gebäudedichte, der Anteil an Grün- und sonstigen Versickerungsflächen, der Versiegelungsgrad, die Gebäudehöhe und die Rauigkeit. Im folgenden Abschnitt wird darauf eingegangen, wie diese Größen mittels Fernerkundung erhoben werden können.

Fernerkundung der Stadtstruktur

Ein zweites bedeutendes Feld zum Einsatz von Fernerkundungsdaten in der Stadtklimatologie ist die Charakterisierung städtischer Oberflächen. Während es mittlerweile eine große Anzahl von Stadtklimamodellen verschiedener Komplexität gibt, sind die benötigten Eingangsdaten oft nicht vorhanden oder inkonsistent. Dies ist besonders in der Mikroskala der Fall, in der jedes einzelne städtische Element (insbesondere Häuser, aber auch Bäume und Straßenmöblierung) in weitere Teile oder Facetten (engl. *facets*) wie Wände, Fenster, Dächer, etc. zerfällt und durch unzählige physikalische Eigenschaften charakterisiert ist. Daneben ist relevant wie die Stadt genutzt wird, um den Metabolismus und die Flüsse von Energie und Materie in die städtische Atmosphäre zu bestimmen. Stadtklimamodelle erfordern also hochwertige Informationen über Form und Funktionen der Stadt. Form bezieht sich dabei sowohl auf die Morphologie als auch auf die Baumaterialien und deren physikalischen Eigenschaften. Die Funktion bezieht sich auf die Nutzung der Gebäude und der Freiflächen und beinhaltet Informationen über anthropogene Emissionen von Wärme und Stoffen.

Stadtklimamodelle benötigen daher eine Datenbank mit Informationen zur Lage der physikalischen Elemente der urbanisierten Landschaft (Gebäude, Bäume, Parks, Straßen usw.) und den dazugehörigen anthropogenen Emissionen. Weiterhin müssten die räumlichen und zeitlichen Schwankungen berücksichtigt werden, die aus den tageszeitlichen, wöchentlichen und jahreszeitlichen Veränderungen der Vegetation und menschlicher Verhaltensweisen (z.B. des Heizverhaltens) resultieren. Diese Daten müssten in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen vorgehalten und für bestimmte Modelle maßgeschneidert werden, wobei diese stark vom Zweck und dem Design des numerischen Modells abhängen. Solche Daten sind aber in der Regel nicht aus amtlichen Quellen verfügbar und – falls doch – meistens inkonsistent.

Um diese Daten bereitzustellen, wurde daher die *World Urban Database and Access Portal Tools* (*WUDAPT*) Initiative gegründet. Sie verfolgt das Ziel, klimarelevante Informationen über städtische Gebiete zu erstellen, zu speichern und zu verbreiten (Ching et al. 2018). Dies geschieht in verschiedenen Detailstufen, die mit den Skalen stadtklimatischer Analyse in Zusammenhang stehen. Diese Stufen beginnen mit einer groben Beschreibung von Nachbarschaften (Level 0, Nachbarschaftsskala) und führen zu detaillierten, flächendeckenden und gerasterten *urban canopy parameters* (Level 1 und 2, Mikroskala). Die urbane Fernerkundung bietet gute Voraussetzungen, um solche Daten kostengünstig und flächendeckend zu erheben. Neben der Fernerkundung werden in *WUDAPT* weitere Methoden wie crowd sourcing und mobile Kartierung eingesetzt, die hier nicht näher betrachtet werden. Im Folgenden werden exemplarisch fernerkundungsbasierte Ansätze für die Nachbarschafts- und Gebäudeskala vorgestellt.

Local Climate Zone Kartierung

Auf der Nachbarschaftsskala kann die Stadt mithilfe von Satellitendaten und maschinellen Lernverfahren der künstlichen Intelligenz in lokale Klimazonen (engl. *Local Climate Zones, LCZ*, Stewart & Oke 2012) kartiert werden (Bechtel et al. 2015). Diese Zonen sind generische Beschreibungen der Stadtlandschaft auf Nachbarschaftsskala (siehe *Abb. 2.2-3*).

Zur Bestimmung dieser Stadtstrukturen werden vor allem multispektrale Satellitendaten und teilweise Radardaten verwendet. In der *WUDAPT* Standardmethode (Bechtel et al. 2015) werden dazu von lokalen Expert*innen Beispiele aller vorhandenen Zonen in der jeweiligen Stadt identifiziert. Mit diesen »Trainingsdaten« sowie multispektralen Satellitendaten von Landsat 8 oder Sentinel-2 »lernt« der Algorithmus spezifische spektrale Eigenschaften der einzelnen *LCZ*-Typen und verwendet diese anschließend, um eine vollständige Karte zu erzeugen. Diese wird anschließend mehrfach verbessert. Diese Karten können direkt in flächendeckende Stadtstrukturparameter wie Albedo, Gebäudehöhe oder Rauigkeit überführt werden. Zuletzt gab es eine sehr dynamische Entwicklung bei der Weiterentwicklung der Kartierungsmethoden mit modernen machine learning Verfahren (Yokoya et al. 2018; Yoo et al. 2019), die zu einer Verbesserung der Qualität und der Abdeckung großer Regionen führte (Demuzere et al. 2019).

3D-Stadtmodelle

Komplexere morphologische Parameter können flächendeckend aus 3D-Stadtmodellen abgeleitet werden. Der gebräuchlichste Ansatz zur Erstellung von Ge-

bäudemodellen ist die Vermessung mit Laserstrahlen (LIDAR) von Flugzeugen oder Hubschraubern (Haala & Brenner 1999). Dieses aktive Fernerkundungsverfahren liefert zunächst eine dreidimensionale Wolke von Oberflächenpunkten, woraus in zwei Schritten Gebäude extrahiert werden: Gebäudedetektion und Gebäuderekonstruktion. Die Gebäudedetektion wird häufig an gerasterten Gittern der Punktwolken durchgeführt, indem ein digitales Oberflächenmodell, ein Geländemodell und ein normalisiertes digitales Oberflächenmodell erstellt werden. Daraus werden die offenen und erhöhten Bereiche abgegrenzt. Bäume und Gebäude werden entweder mithilfe von Form- oder Rauheitsparametern oder durch zusätzliche Informationen aus optischen Daten (Farbe, Textur) unterschieden. Die Gebäuderekonstruktion optimiert die digitale Darstellung jedes Gebäudes und rekonstruiert die Geometrie des Gebäudegrundrisses und des Daches. Typischerweise wird dafür eine Reihe von Annahmen getroffen, z. B. dass Wände vertikal sind und Dächer aus ebenen Flächen bestehen. Oft wird auch eine vordefinierte Bibliothek bekannter Dachformen verwendet, die an die Punktwolke angepasst werden (Li & Guan 2011).

Fazit

Generell sind die Stadtstruktur und in Folge das Stadtklima durch eine hohe räumliche Heterogenität gekennzeichnet. Daher sind Messungen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erforderlich, um die kleinräumigen Unterschiede zu erfassen. Die Fernerkundung von Satelliten und Flugzeugen bietet dafür einen vielversprechenden Ansatz. Relevante stadtklimatische Effekte wie die Oberflächenwärmeinsel lassen sich direkt durch Fernerkundung beobachten. Die Überwärmung der städtischen Lufttemperatur lässt sich dagegen nur indirekt und daher sehr eingeschränkt von Satelliten messen. Dafür können durch Fernerkundung jedoch wichtige Informationen über die Stadtstruktur in verschiedenen Skalen (etwa *Local Climate Zones* oder 3D-Stadtmodelle) gewonnen werden, die als Eingangsdaten für Stadtklimamodelle dienen.

Literatur

AGEMAR T., R. SCHELLSCHMIDT & R. SCHULZ (2012): Subsurface temperature distribution in Germany. - Geothermics, 44, 65-77.

BECHTEL B., P. J. ALEXANDER, J. BÖHNER, J. CHING et al. (2015): Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. - ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(1), 199-219.

BECHTEL B., M. DEMUZERE, P. SISMANIDIS, D. FENNER et al. (2017): Quality of Crowdsourced Data on Urban Morphology. The Human Influence Experiment (HUMINEX). - Urban Science, 1(2), 15.

BENZ S. A. (2016): Human Impact on Groundwater Temperatures. 155 S. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Bibliothek, Karlsruhe.

BENZ S. A., P. BAYER & P. BLUM (2017): Global patterns of shallow groundwater temperatures. - Environmental Research Letters, 12(3), 034005.

CHING J., G. MILLS, B. BECHTEL, L. SEE et al. (2018): WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. - Bulletin of the American Meteorological Society, 99(9), 1907-1924.

DEMUZERE M., B. BECHTEL, A. MIDDEL & G. MILLS (2019): Mapping Europe into local climate zones. PLOS ONE, 14(4), e0214474.

HAALA N. & C. BRENNER (1999): Extraction of buildings and trees in urban environments. - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2), 130-137.

HEMMERLE H., S. HALE, I. DRESSEL, S. A. BENZ et al. (2019): Estimation of Groundwater Temperatures in Paris, France. - Geofluids, 2019, 1-11.

LI J. & H. GUAN (2011): 3D building reconstruction from airborne lidar point clouds fused with aerial imagery. – In: Yang X. (ed.): Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment. 75-92.

MITRAKA Z. & N. CHRYSOULAKIS (2014): Advanced satellite image fusion techniques for estimating high resolution land surface temperature time series. - 12th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, 2, 267-271.

OKE T. R., G. MILLS, A. CHRISTEN & J. A. VOOGT (2017): Urban climates. 525 S. Cambridge University Press, Cambridge.

RAO P. K. (1972): Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. - Bulletin American Meteorological Society, 53, 647-648.

RIVERA J. A., P. BLUM & P. BAYER (2015): Analytical simulation of groundwater flow and land surface effects on thermal plumes of borehole heat exchangers. - Applied Energy 146, 421-433.

ROTH M., T. R. OKE & W. J. EMERY (1989): Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. - International Journal of Remote Sensing, 10(11), 1699-1720.

STEWART I. D. & T. R. OKE (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. - Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900.

TANIGUCHI M., T. UEMURA & Y. SAKURA (2005): Effects of urbanization and groundwater flow on subsurface temperature in three megacities in Japan. - Journal of Geophysics and Engineering, 2(4), 320-325.

TISSEN C., S. A. BENZ, K. MENBERG, P. BAYER & P. BLUM (2019): Groundwater temperature anomalies in central Europe. Environmental Research Letters, 14(10), 104012.

WICKI A. & E. PARLOW (2017): Multiple regression analysis for unmixing of surface temperature data in an urban environment. - Remote Sensing, 9(7), 684.

WICKI A., E. PARLOW & C. FEIGENWINTER (2018): Evaluation and modeling of urban heat island intensity in Basel, Switzerland. - Climate, 6(3), 55.

YOKOYA N., P. GHAMISI, J. XIA, S. SUKHANOV et al. (2018): Open Data for Global Multimodal Land Use Classification: Outcome of the 2017 IEEE GRSS Data Fusion Contest. - IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11(5), 1363-1377.

YOO C., D. HAN, J. IM & B. BECHTEL (2019): Comparison between convolutional neural networks and random forest for local climate zone classification in mega urban areas using Landsat images. - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 157, 155-170.

Kontakt

Prof. Dr. Benjamin Bechtel
Geographisches Institut - Urban Climatology Group
Ruhr-Universität Bochum - benjamin.bechtel@rub.de
Dr. Susanne A. Benz
School of Global Policy and Strategy, Big Pixel Initiative, University of California San Diego
sabenz@ucsd.edu
Dr. Andreas Wicki
MCR Universität Basel und GEO Partner AG
wicki@geopartner.ch

Bechtel B., S. A. Benz & A. Wicki (2019): Einsatz von Satelliten zur Analyse des Stadtklimas. In: Lozán, J. L. S.-W. Breckle, H. Graßl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 66-73. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.10.

3 STADTKLIMA UNTERSCHIEDLICHER REGIONEN WELTWEIT

Städte entstanden meist an Handelsknotenpunkten. Früh erkannten die Menschen, dass regionale und lokale Effekte ihre Städte positiv und negativ beeinflussen können. Schon in der Antike war bekannt, dass man regionale und lokale Winde berücksichtigen sollte und Schwachwindlagen die Lebensqualität in den Städten beinträchtigen können. Man bevorzugte Beckenlagen, um Sturmgefährdungen auszuweichen sowie die Lage an Flüssen und Küsten, und dies nicht nur wegen des Handels. Städte waren und sind »Hot spots« oder »Magnete« für ein besseres Leben. So wurden Städte immer größer und größer, aber die Umweltbelastungen für Mensch und Natur auch. Je größer eine Stadt ist, umso eher dominiert sie über die natürlichen Ökosysteme ihres Umlandes. Es geht aber nicht nur um die Auswirkungen auf das Klima, sondern auch darum, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um möglichst die jetzigen klimatischen Bedingungen beizubehalten oder einen noch stärken Einfluss darauf zu verhindern. Mögliche Lösungen werden heute mit klimatischen Untersuchungen und Klimasimulationen für viele große Städte und unterschiedliche Stadtstrukturen in verschiedenen Klimaregionen angeboten.

3.1 Stadtklimauntersuchungen in ausgewählten deutschen Städten

PETRA FUCHS

Auch die urbanen Räume in Deutschland sind besonders anfällig gegenüber wetterbedingten Extremereignissen. Viele deutsche Städte stehen bereits heute vor großen Herausforderungen, wenn es darum geht, einerseits die Folgen des Klimawandels zu bewältigen und sich an den Klimawandel anzupassen und andererseits die hohe Nachfrage nach Wohnraum und urbaner Infrastruktur zu befriedigen. Sie sind daher gefordert, integrierte vorausschauende Strategien zum Klimaschutz und zu einer frühzeitigen Anpassung an den Klimawandel zu entwickeln. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) unterstützt und berät Städte und Gemeinden zu Fragen des Klimawandels und deren Folgen für Mensch und Gesellschaft. Ziel der Stadtklimaforschung des DWD ist es, bei den Städten und Kommunen entscheidungsrelevantes Wissen zum Klimawandel und zur Klimaanpassung aufzubauen. Dafür wurden in Zusammenarbeit mit ausgewählten Kommunen Stadtklimaprojekte zu unterschiedlichen Fragestellungen durchgeführt. Anhand der Beispiele Stuttgart, Mainz und Wiesbaden werden die Ergebnisse von Stadtklimauntersuchungen zum Thema Hitzebelastung in diesem Kapitel vorgestellt.

Urban climate studies in selected German cities: *The urban areas in Germany are also particularly vulnerable to weather-related extreme events. Many German cities are already facing major challenges to cope the consequences of climate change and adapt to climate change, while at the same time to satisfy the high demand for housing and urban infrastructure. They are therefore called upon to develop integrated forward-looking strategies for climate protection and early adaptation to climate change. The German Weather Service (DWD) supports and advises cities and municipalities on issues of climate change and their consequences for people and society. The aim of urban climate research at the DWD is to build decision-relevant knowledge on climate change and climate adaptation in cities and municipalities. In cooperation with selected municipalities, urban climate projects on various issues were carried out. Based on the examples of Stuttgart, Mainz and Wiesbaden, the results of urban climate investigations on the subject of heat stress are presented in this chapter.*

Stadtklimaprojekt Stuttgart

Ziele

Der DWD untersuchte in Kooperation mit der Landeshauptstadt Stuttgart die klimatischen Verhältnisse und die daraus resultierenden thermischen Belastungssituationen in Stuttgart (SCHLEGEL et al. 2017). Im Fokus stand die Ermittlung der räumlichen Verteilung der Wärmebelastung für Menschen bei sommerlichen Strahlungswetterlagen. Für eine den Klimawandel berücksichtigende Stadtplanung in Stuttgart sollte einerseits eine hochaufgelöste Datenbasis bereitgestellt und wurden andererseits die modellbasierten Klimasimulationen anhand detaillierter Klimamessungen überprüft.

Untersuchungsgebiet

Die klimatischen Verhältnisse in Stuttgart werden neben anderen Faktoren stark von der topografischen Lage der Stadt im sogenannten Stuttgarter Kessel geprägt. Im Westen ist der Schwarzwald vorgelagert, im Süden

die Schwäbische Alb und im Osten der Schurwald. Das Strom- und Heuchelberggebiet bildet die nordwestliche Begrenzung. Von Südosten nach Norden verläuft das Neckartal und formt einen breiten Einschnitt in die Landschaft. Der Nesenbach durchfließt von Kaltental kommend den Stuttgarter Talkessel und mündet bei Bad Cannstatt in das Neckartal ein. Das Zentrum von Stuttgart mit dem eigentlichen Talkessel liegt abseits des Neckars in einer Senke, die vom Nesenbach und seinen Zuflüssen gebildet wurde (siehe *Abb. 3.1-1*). Das Stuttgarter Stadtgebiet weist wegen der starken topographischen Gliederung einen Höhenunterschied von mehr als 300 m zwischen dem Kesselboden und den Randhöhen auf (LHS 2016).

Aufgrund der abgeschirmten Lage herrscht in Stuttgart ein vergleichsweise mildes Klima. Die Kessellage des Stadtzentrums blockiert die großräumige Strömung der Region und sorgt für windschwache Bedingungen in der Stadt. Der Stuttgarter Kessel ist der wärmste und trockenste Teil des Neckarbeckens. Die Lufttemperatur im Stuttgarter Zentrum betrug zwischen 2000-2010 im Mittel ca. 11,8 °C und am Flughafen in Stuttgart-Echterdingen oberhalb des Kessels ca. 9,8 °C. Die Differenz zwischen der Lufttemperatur in der Innenstadt und der im Umland kann bei wolkenarmen windschwachen Wetterlagen bis zu 7 Kelvin (K) betragen (Ketterer 2015). Die topgraphisch bedingte geringe Windgeschwindigkeit fördert die Ausbildung von lokalen, thermisch induzierten Windsystemen, die für die Belüftung der Stadt eine wichtige Rolle spielen. Hier sind beispielsweise die Kaltluftabflüsse aus dem Nesenbachtal und dem Tal der Heidenklinge für den zentralen Bereich des Stuttgarter Talkessels von Bedeutung.

Methodik

Als Datengrundlage dienten im Projekt langjährige Messreihen des DWD sowie der Stadt Stuttgart, die durch Daten aus Messkampagnen mit drei temporären Messstationen und Profilmessfahrten ergänzt wurden. Zur Analyse der Wärmebelastung wird die Gefühlte Temperatur als thermischer Index zugrunde gelegt. Die Gefühlte Temperatur beschreibt das thermische Empfinden eines Menschen und berücksichtigt neben der Temperatur auch die Parameter Luftfeuchte, Wind und Strahlung. Die Berechnung beruht auf einem Modell des Energieaustausches eines »Standard-Menschen«, dem sogenannten Klima-Michel, mit seiner Umgebung (Staiger et al. 2012, Matzarakis & Koppe 2016). Das Klima-Michel-Modell wurde als Wärmehaushaltsmodell zur Berechnung der Gefühlten Temperatur im Projekt angewendet. Um die Anzahl der Tage mit starker Wärmebelastung (das sind Tage mit einer Gefühlten Temperatur ≥ 32 °C) in Stuttgart mit einer räumlichen Auflösung von 100 m in Abhängigkeit von der Landnutzung bestimmen zu können, wurde das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 in Verbindung mit dem Klima-Michel-Modell eingesetzt (Früh et al. 2011a, b; Sievers 2012, 2016; DWD 2016a).

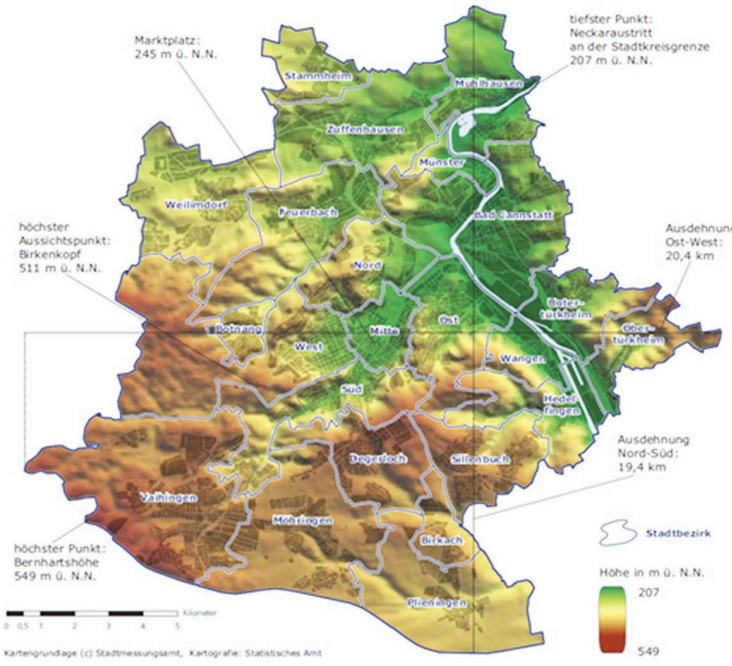


Abb. 3.1-1: *Topographische Darstellung der Stuttgarter Region mit eingezeichneten Stadtbezirken (LHS 2016).*

Hoch aufgelöste Simulationen mit dynamischen Klimamodellen wie MUKLIMO_3 für klimatologische Zeiträume von 30 Jahren sind technisch sehr aufwendig. Zur Berechnung der mittleren jährlichen Anzahl von Tagen mit starker Wärmebelastung für die 30-jährigen Zeiträume 1971-2000 und 2031-2060 wurde daher die Quadermethode als dynamisch-statistisches Downscaling-Verfahren eingesetzt (Früh et al. 2011a, b) und damit der Rechenaufwand erheblich reduziert.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellrechnungen haben gezeigt, dass die mittlere jährliche Anzahl an Wärmebelastungstagen im Stadtgebiet von Stuttgart stark von der Geländehöhe und der Landnutzung abhängig ist. Die Modellsimulationen für den Referenzzeitraum 1971-2000 ergaben auf freien Kuppenlagen eine geringere Anzahl an Wärmebelastungstagen (< 20) und in bewaldeten Kuppenlagen nur weniger als 5 Wärmebelastungstage pro Jahr. In den bebauten Tallagen wie dem Stuttgarter Kessel, dem Neckartal, dem Feuerbachtal oder dem Rohrackertal tritt starke Wärmebelastung hingegen an über 30 Tagen pro Jahr auf. In einigen Industrie- und Gewerbegebieten, in denen das Neckartal eine geringe Talbreite aufweist, wie z.B. in den südöstlichen Stadtteilen Wangen, Untertürkheim und Mettingen, werden auch über 40 Wärmebelastungstage pro Jahr erreicht.

Die Zunahme der Tage mit starker Wärmebelastung bis zum Zeitraum 2031-2060 im Vergleich zum Referenzeitraum 1971-2000 wurde auf Basis von Ergebnissen aus 17 regionalen Klimaprojektionen berechnet und statistisch ausgewertet. Betrachtet man die Spannweite der Projektionsergebnisse, was statistisch gesehen hier dem Bereich zwischen dem 25. und dem 75. Perzentil entspricht, muss für Stuttgart für den Projektionszeitraum 2031-2060 von ca. 50 bis 70 Tagen mit Wärmebelastung im Neckartal im Südosten des Stadtgebiets, von ca. 40 bis 60 Tagen in den warmen Bereichen des Stuttgarter Kessels, von ca. 20 bis 40 Tagen auf den freien Hochlagen der Filder, und von ca. 5 bis 20 Tagen in den bewaldeten Kuppenlagen ausgegangen werden (siehe *Abb. 3.1-2*).

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Stadt Stuttgart bei Eintreten des Emissionsszenarios A1B (Jacob 2008) auf eine deutlich erhöhte Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung einstellen muss. Im ungünstigen Fall (75. Perzentil) kann sich die Anzahl an Belastungstagen bis zur Mitte des Jahrhunderts gegenüber 1971-2000 etwa verdoppeln. Es zeigt sich deutlich, dass in Tallagen insbesondere auch Industrie- und Gewerbegebiete von hoher Wärmebelastung betroffen sind und dass die bewaldeten Kuppenlagen um die Siedlungskerne als kühleres Refugium bei Hitzesituationen auch zukünftig von besonderer Bedeutung sein werden. Damit wird die Relevanz solcher Stadtklimauntersuchungen für die künftige Stadtplanung deutlich.

Alle Ergebnisse können im Abschlussbericht des Stadtklimaprojekts Stuttgart nachgelesen werden (Schlegel 2017).

Stadtklimaprojekt KLIMPRAX mit Mainz und Wiesbaden als Modellstädte

Ziele

Das Projekts KLIMPRAX (KLIMawandel in der PRAXis) hatte zum Ziel, dass stadtklimatische Belange in den kommunalen Planungsprozessen stärker berücksichtigt werden (Link zur Projektseite). Mainz und Wiesbaden dienten dabei als Modellstädte, deren Ergebnisse auch auf andere Kommunen übertragen

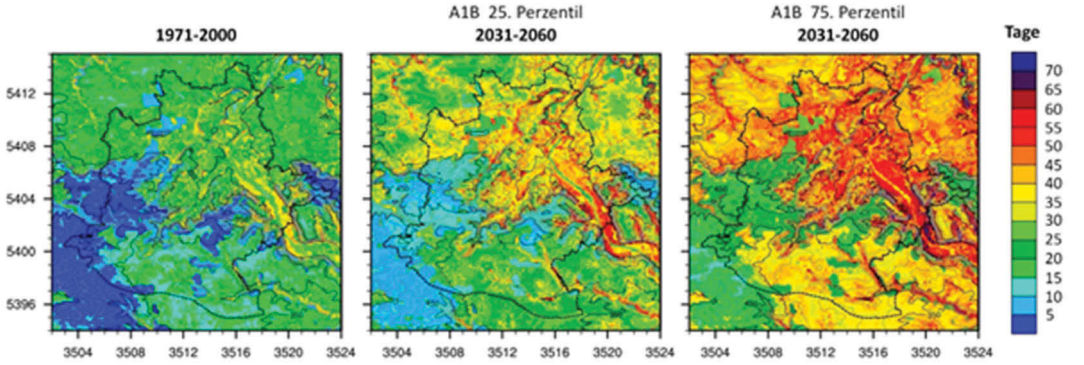


Abb. 3.1-2: *Mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit starker Wärmebelastung ($NGT_{max} \geq 32°C$) für den Zeitraum 1971–2000 im Stuttgarter Raum sowie Projektion für den Zeitraum 2031-2060 für das Emissionsszenario A1B (25. und 75. Perzentil). Zusätzlich eingezeichnet sind Isolinien der Geländehöhe im 20 m Abstand unter Hervorhebung der Höhen 250, 350 und 450 m ü. NN und die Stadtgrenze in schwarz. Die Achsenwerte markieren die Gauß-Krüger Koordinaten des Auswertegebiets.*

werden sollten. Der DWD stellte zunächst die meteorologischen Daten und Informationen zur Verfügung, die in einem weiteren Schritt in planungsrelevante Kategorien übersetzt wurden (HLNUG 2019). Untersucht wurde das gegenwärtige (1971-2000) und das zukünftige (2031-2060) Stadtklima in Mainz und Wiesbaden. Im Anschluss wurden die Prozesse analysiert, die zu einer Entlastung bei Hitze in der Stadt beitragen können.

Auch in diesem Projekt wurden Simulationen mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (Sievers 2012, 2016) mit einer Auflösung von 100 m durchgeführt. Ermittelt wurde die räumliche Verteilung der mittleren Anzahl von Sommertagen ($T_{max} \geq 25$ °C), heißen Tagen ($T_{max} \geq 30$ °C) und Tropennächten ($T_{min} \geq 20$ °C). Die Aussagen über das zukünftige Klima basieren wiederum auf Ergebnissen aus 17 regionalen Klimaprojektionen.

Untersuchungsgebiet

Das innenstädtische Gebiet von Wiesbaden liegt in einem Talkessel am oberen Rand des Salzbachtales im sogenannten Wiesbadener Kessel auf etwa 120 m ü. NN. Nördlich davon erhebt sich der Taunus. Das bebaute Gebiet von Naurod, dem höchstgelegenen Ortsteil im Nordosten von Wiesbaden, liegt auf ca. 260 bis 310 m ü. NN. Am höchsten Punkt Wiesbadens, an der Hohen Wurzel, etwa 7 km nordwestlich der Innenstadt

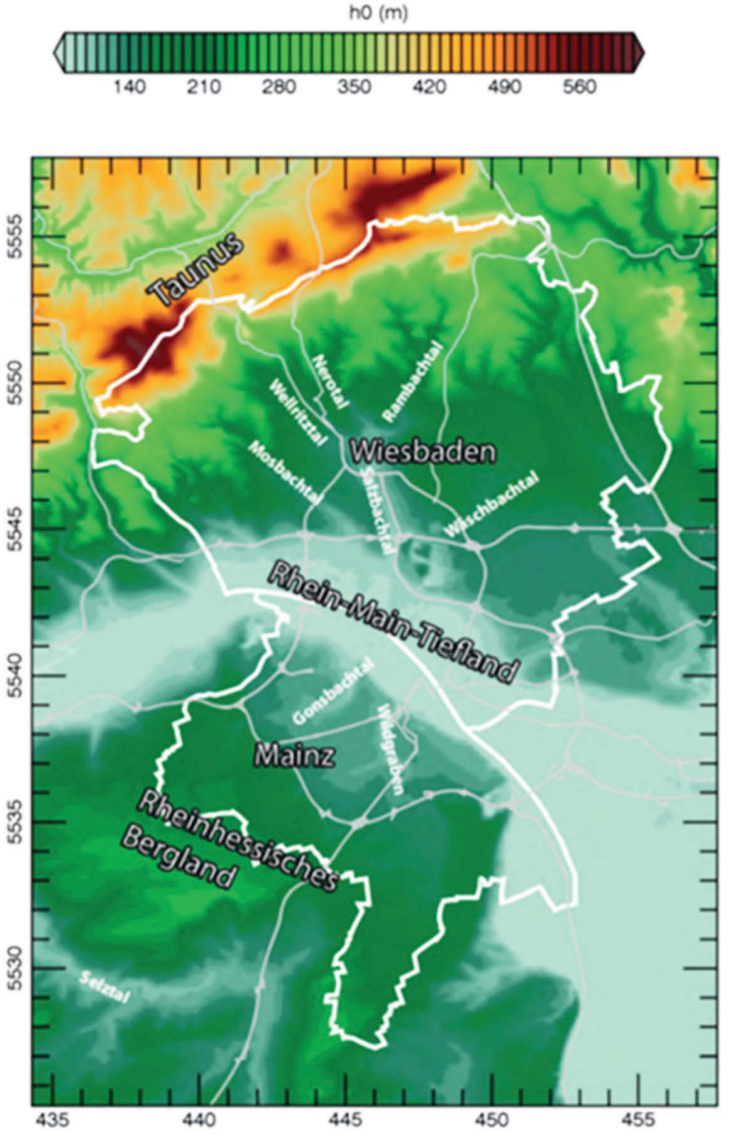


Abb. 3.1-3: *Geländehöhe des Modellgebiets in m über NN mit den Grenzen des politischen Stadtgebiets von Mainz im Süden und Wiesbaden im Norden. Die hellgrauen Linien geben die Hauptverkehrsstraßen wieder.*

werden knapp über 600 m ü. NN erreicht (zur Höhenverteilung des Untersuchungsgebiets s. *Abb. 3.1-3*). Neben der Innenstadt befinden sich große zusammenhängende, dicht bebaute Gebiete auch am Rhein (Biebrich, Amöneburg, Mainz-Kastel). Unmittelbar südwestlich des Rheins, der auch die Grenze zwischen den beiden Landeshauptstädten bildet, liegt die Mainzer Innenstadt. Daran schließt sich dann das Rheinhessische Bergland an. Das Gelände ist in Mainz jedoch wesentlich weniger stark strukturiert als auf der Wiesbadener Seite und erreicht maximal knapp 250 m ü. NN (siehe *Abb. 3.1-3*).

Das Klima im Gebiet Mainz/Wiesbaden ist gekennzeichnet durch milde Winter, warme Sommer und räumlich stark variierende jährliche Niederschlagsmengen, was charakteristisch für den gesamten südwestdeutschen Raum ist. Vor allem in Städten muss auch heute schon mit einer hohen sommerlichen Wärmebelastung gerechnet werden. *Abb. 3.1-4*, in der die mittlere Anzahl der Sommertage und der heißen Tage der Periode 1971–2000 aller Landeshauptstädte sowie von Frankfurt/Main, Freiburg und Karlsruhe dargestellt werden, verdeutlicht, dass Mainz und Wiesbaden die Landeshauptstädte mit der stärksten sommerlichen Wärmebelastung sind (Noppel 2017).

Methode

Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 wurde auch in diesem Projekt eingesetzt, um Simulationen für unterschiedliche meteorologische Bedingungen für die Region Wiesbaden/Mainz durchzuführen (Sievers 2012, 2016; DWD 2016a). Auf Basis von Messungen an der Klimastation Frankfurt/Flughafen und mit Hilfe der bereits erwähnten Quadermethode (Früh et al. 2011a, b) wurden daraus räumlich hoch aufgelöste Klimatologien zur Anzahl der Sommertage, der heißen Tage und der Tropennächte für den 30-jährigen Zeitraum 1971-2000 bestimmt. Die Landnutzungsszenarien wurden variiert, um den Einfluss der Stadt auf das Klima einschätzen zu können.

Verschiedene Klimaprojektionen wurden wiederum herangezogen, um Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Hitzebelastung treffen zu können. Dazu wurden die Ergebnisse aus 17 regionalen Klimaprojektionen ausgewertet und die räumliche Verteilung der Zunahme der Klimaindizes bis zum Zeitraum 2031-2060 in den beiden Städten Mainz und Wiesbaden bestimmt. Durch die Verwendung mehrerer Klimaprojektionen erhält man eine mögliche Spannbreite der Ergebnisse und kann somit die Unsicherheiten in den verwendeten Klimamodellen berücksichtigen (Noppel 2017).

Ergebnisse

Unter Berücksichtigung der Geländehöhe und der Bebauungsstruktur bzw. Landnutzung wurden die Modellrechnungen für unterschiedliche sommerliche

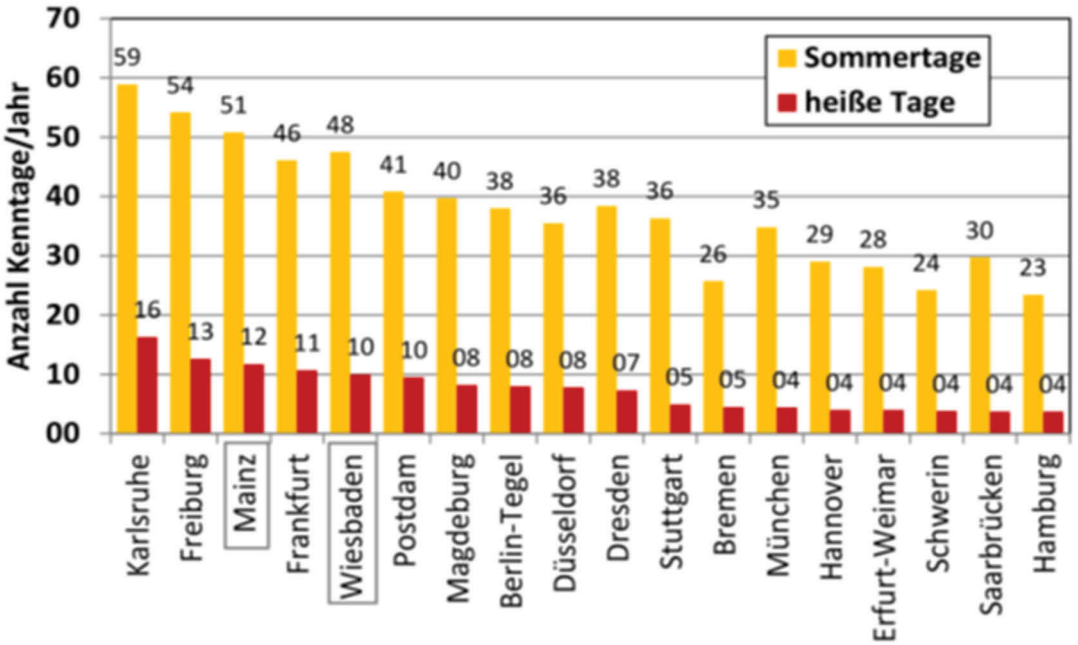


Abb. 3.1-4: *Mittlere Anzahl von Sommertagen und heißen Tagen pro Jahr in Landeshauptstädten sowie den Städten Karlsruhe, Freiburg und Frankfurt/Main für den Zeitraum 1971-2000, sortiert nach der Anzahl der heißen Tage.*

meteorologische Bedingungen für die Region Wiesbaden/Mainz durchgeführt und daraus räumlich hoch aufgelöste Karten zur Anzahl der Sommertage, der heißen Tage und der Tropennächte für den 30-jährigen Zeitraum 1971–2000 erstellt. Die Ergebnisse zeigen in der Fläche deutliche Differenzierungen. So werden in den Innenstädten bis über 65 Sommertage, ca. 20 heiße Tage und 15 Tropennächte erreicht, während z.B. die Werte im weniger dicht bebauten und etwas höher gelegenen Wiesbaden-Auringen mit ca. 32 Sommertagen,6 heißen Tagen und 2 Tropennächten deutlich niedriger liegen.

Um den Einfluss der Bebauung auf die räumliche Verteilung besser von der des Geländes unterscheiden zu können, wurden die Untersuchungen mit einem virtuellen Landnutzungsszenario ohne Bebauung wiederholt. Allein die Bebauung führt in den Innenstädten zu einer Erhöhung um ca. 20 Sommertage, 10 heiße Tage und bis zu 15 Tropennächte im Jahr (siehe *Abb. 3.1-5*).

Von großem Interesse für die Städte ist die zukünftige Entwicklung der Hitzebelastung. Dazu wurde die räumliche Verteilung der Zunahme der Klimakenntage für den Zeitraum 2031-2060 in beiden Städten bestimmt. Im gesamten Untersuchungsgebiet ist eindeutig mit einer Zunahme aller drei Klimaindizes zu rechnen, wobei der Anstieg im Rheintal stärker ist als im Taunus. Betrachtet man das 75. Perzentil, das den oberen Bereich der Ergebnismenge der Klimaprojektionen widerspiegelt, dann ist am Standort der Klimastation Wiesbaden-Süd in Zukunft mit einer Erhöhung um ca. 23 Tage auf im Mittel 71 Sommertage und an der Station in Mainz auf 73 Sommertage im Jahr zu rechnen. Der Anstieg der Tropennächte um 4 bis 16 ist prozentual gesehen besonders hoch (siehe *Abb. 3.1-5*).

Der Einfluss der Landnutzung bzw. der Bebauungsstruktur auf die Temperaturverteilung wurde statistisch ausgewertet. Daraus ergibt sich, dass im Mittel Gebiete mit Block- und Innenstadtbebauung erwartungsgemäß am wärmsten sind. Hier ergeben sich z.B. 10 bis 15 Sommertage mehr als in unbebauten Gebieten. Tagsüber ist es in Waldgebieten am kühlsten, nachts auf Freiflächen wie Wiesen, Äckern oder in Gärten. Aber auch Siedlungsgebiete mit Ein- und Mehrfamilienhaus- oder Reihenhausbebauung kühlen nachts im Vergleich zu Gebieten mit Blockbebauung noch gut ab. Statistische Analysen der bis 2031-2060 zu erwartenden Erwärmung deuten darauf hin, dass vor allem die Anzahl der heißen Tage in den dicht bebauten, ohnehin schon überwärmten Bereichen, stärker zunehmen wird als in nur locker bebauten oder unbebauten Gebieten.

Da die städtische Wärmeinsel in der Nacht am stärksten ausgeprägt ist und eine fehlende nächtliche Abkühlung sich besonders negativ auf das Wohlbefinden und die Gesundheit auswirkt, spielen hier die nächtliche Bildung von Kaltluft und die damit verbundenen Kaltluftabflüsse eine entscheidende Rolle (s. Kap. 1.5 - Katzschner & Kupski in diesem Band). Daher wurde anhand der Stadtklimamodell-Ergebnisse flächendeckend das Potential der bisher unbebauten Flächen zur

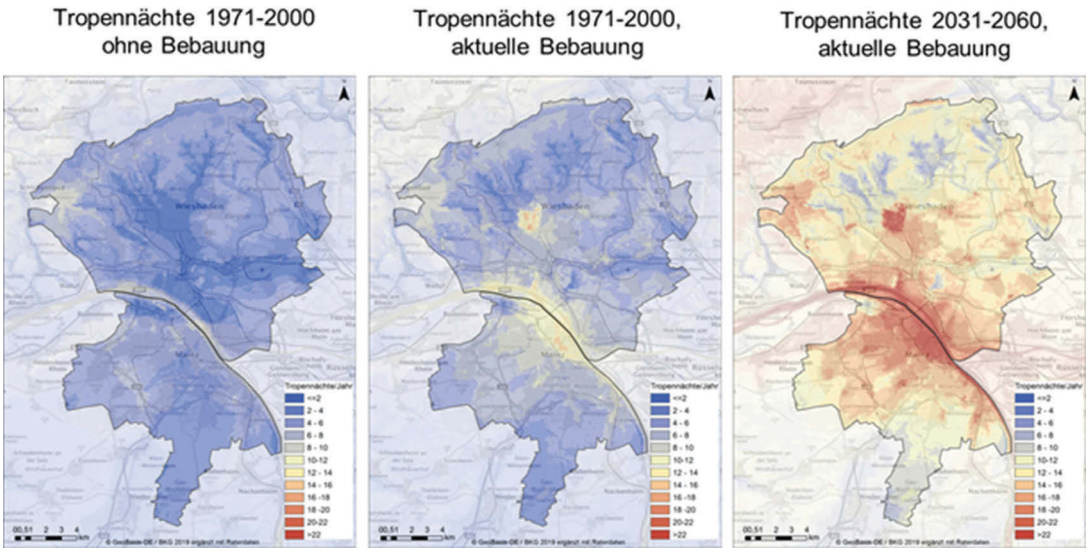


Abb. 3.1-5: *Mittlere jährliche Anzahl von Tropennächten ($T_{min} \geq 20°C$) in Mainz und Wiesbaden für den Zeitraum 1971–2000 ohne und mit Bebauung sowie Projektion für den Zeitraum 2031-2060 basierend auf 16 Stadtklimamodellsimulationen und 17 Klimaprojektionen.*

Bildung von Kaltluft analysiert und Trajektorien der Kaltluft bestimmt. Zusätzlich wurden Volumenstromdichten sowie die mittlere Temperatur von Kaltluftabflüssen berechnet, um Aussagen zur Mächtigkeit und Wirksamkeit der Kaltluft machen zu können.

Die Analysen dieser Berechnungen zeigen, dass Kaltluft vor allem auf am Hang gelegenen Freiflächen gebildet wird, aber auch auf innerstädtischen Grünflächen kann Kaltluft entstehen. In *Abb. 3.1-6* sind Gebiete mit einer hohen Wärmebelastung Kaltluftentstehungsgebieten gegenübergestellt.

Für die Zufuhr kühlerer Luft in die Wiesbadener Innenstadt spielen vor allem das Nerotal und das Rambachtal eine wichtige Rolle (siehe auch *Abb. 3.1-3*). Für die am Rhein gelegenen Ortsteile Wiesbadens haben die aus Norden kommenden Täler eine wichtige Funktion. Die auf den Freiflächen zwischen Erbenheim, Igstadt und Bierstadt gebildete Kaltluft strömt nach Mainz-Kastel und teilweise sogar über den Rhein hinweg bis zur Mainzer Innenstadt und nach Weisenau. Da die Hänge des Rheinhessischen Hügellandes flacher sind als die des Taunus, dauert es auf der Mainzer Seite des Rheins etwas länger bis sich Kaltluftabflüsse ausbilden. In der zweiten Nachthälfte erfolgt dann die Belüftung der Mainzer Innenstadt vorwiegend aus Süden. Für Mainz Mombach spielen das Gonsbachtal sowie die Kaltluftentstehungsgebiete um Lerchenberg und Drais eine wichtige Rolle.

Alle Ergebnisse der Stadtklimauntersuchung wurden im Bericht des Deutschen Wetterdienstes 249 (Noppel 2017) veröffentlicht. Die Projektergebnisse können im erarbeiteten Handlungsleitfaden für Kommunen nachgelesen werden (HLNUG 2019)

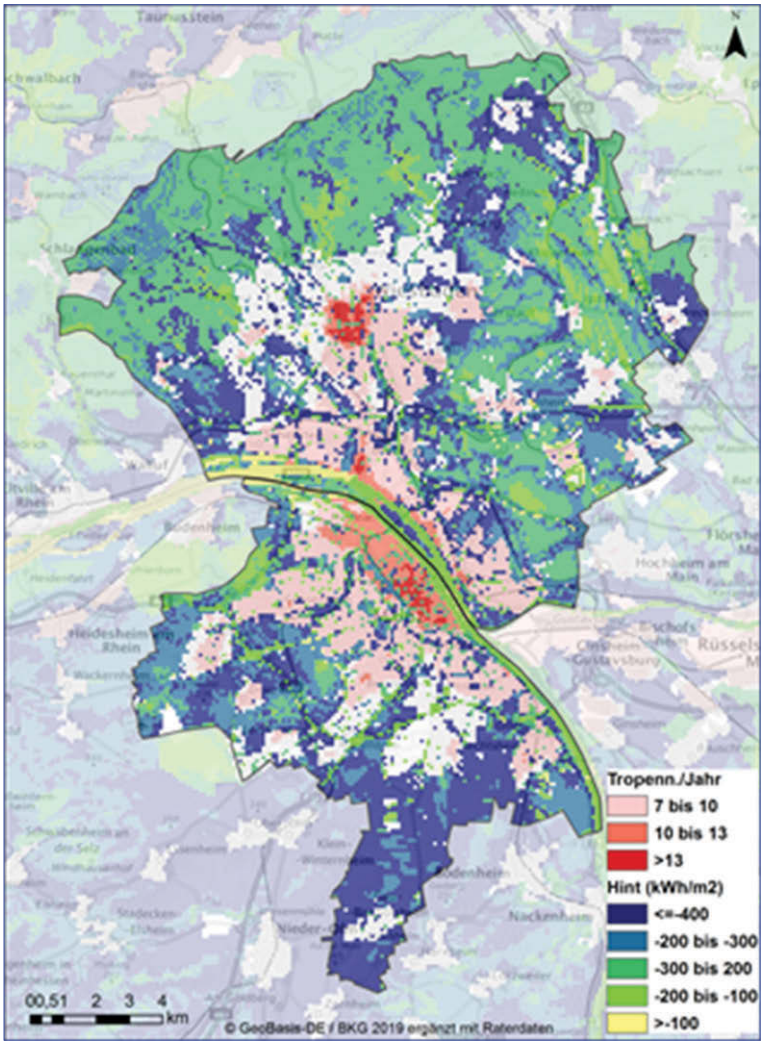


Abb. 3.1-6: *Kaltluftbildung zwischen 22 und 4 Uhr (bebaute Flächen sind ausgenommen) und mittlere jährliche Anzahl von Tropennächten (T_{min} ≥20°C) in Mainz und Wiesbaden für den Zeitraum 1971-2000.*

Schlussbetrachtung

Die Anpassung an die Folgen des Klimawandels wird in Städten immer mehr auch als Querschnittsaufgabe verstanden, um die Lebensqualität, Zukunftsfähigkeit und Wirtschaftskraft in den urbanen Regionen zu erhalten und weiterentwickeln zu können. Dazu brauchen die Städte und Kommunen verlässliche meteorologische Daten und in der Fläche hoch aufgelöste Informationen zur künftigen Entwicklung des Klimas, wie sie beispielsweise in den beschriebenen Stadtklimaprojekten erarbeitet und bereitgestellt wurden.

In der Zusammenarbeit mit Städten und Kommunen zum Thema Klimawandel und Klimaanpassung wird aber auch deutlich, dass es nicht nur wichtig ist, die relevanten Ergebnisse der Klimaforschung zur Verfügung zu stellen, sondern diese auch so aufzubereiten, dass sie in den kommunalen Entscheidungsprozessen Berücksichtigung finden können. Maßgeschneiderte Informationssysteme und Beratungswerkzeuge sind notwendig, damit Städte und Kommunen entscheidungsrelevantes Wissen zum Klimawandel und zur Klimaanpassung aufzubauen und Anpassungsstrategien entwickeln und umsetzen können.

Literatur

DWD (2016a): Gefühlte Temperatur, Schwüle und Wind Chill. *https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100932&lv3=100988.*

FRÜH B., M. KOSSMANN & M. ROOS (2011a): Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237, 68 S.

FRÜH B., P. BECKER, T. DEUTSCHLÄNDER, J.-D. HESSEL, M. KOSSMANN, I. MIESKES, J. NAMYSLO, M. ROOS, U. SIEVERS, T. STEIGERWALD, H. TURAU & U. WIENERT (2011b): Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate pro-jections. Journal Applied Meteorology and Climatology 50, 1, 167-184.

HLNUG (2019): Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen – Hitze und Gesundheit -*https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimprax/KLIMPRAXStadtklima2019/L-Handlungsleitfaden2019_Einzelseiten.pdf*

JACOB, D., H. GÖTTEL, S. KOTLARSKI, P. LORENZ & K. SIECK (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland. Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. UBA, Reihe Climate Change 11/08.

KETTERER C. & A. MATZARAKIS (2015): Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. Int. J. Biometeorol 59, 1299-1309.

LHS (Landeshauptstadt Stuttgart) (2016): Stuttgart Topographische Karten. Statistisches Amt. *https://servicex.stuttgart.de/lhs-services/komunis/documents/8851_1_Stuttgart_in_Karten_Datenkompass_Stadtbezirke_Stuttgart_2010_2011.PDF.*

MATZARAKIS A. & C. KOPPE (2016): Hitzewellen – eine zunehmende Gesundheitsgefahr. Internistische Praxis 56, 585-592.

NOPPEL H. (2017): Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 249, 101 S.

SCHLEGEL I. & M. KOSSMANN (2017): Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Wärmebelastung in Stuttgart als Grundlage zur Anpassung an den Klimawandel. Ergebnisbericht der Kooperation zwischen der Landeshauptstadt Stuttgart und dem Deutschen Wetterdienst.

SIEVERS U. (2012): Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 1: Theoretische Grund-lagen, PC-Basisversion und Validierung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 240, 142 S.

SIEVERS U. (2016): Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 248, 151 S. *http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201606173510.*

STAIGER H., G. LASCHEWSKI & A. GRÄTZ (2012): The perceived temperature – a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. Int J Biometeorol 56, 165-176.=

Kontakt:
Dr. Petra Fuchs
Deutscher Wetterdienst - DWD-Offenbach
petra.fuchs@dwd.de

Fuchs P. (2019): Stadtklimauntersuchungen in ausgewählten deutschen Städten. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis.(Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 74-81. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.11.

3.2 Küstenstädte - das Beispiel New York

DIETER KASANG

Wie zahlreiche andere Küstenstädte ist New York einem starken Risiko durch Extremereignisse ausgesetzt, die sich durch den Klimawandel erhöht haben. Dazu gehören vor allem Sturmfluten, wie sie das moderne New York durch den Hurrikan Sandy 2012 erlebt hat, der die Gefährdung der Stadt zu einem politischen Thema auch für die Zukunft gemacht hat. Die Hochwassergefahr vom Meer her wird in New York auch durch einen - im globalen Vergleich ungewöhnlich starken - Meeresspiegelanstieg forciert. Zusätzlich leidet die Stadt durch die dichte Bebauung unter Hitzewellen, deren Häufigkeit und Intensität infolge der globalen Erwärmung in den nächsten Jahrzehnten zunehmen werden. Angesichts dieser Lage hat die Verwaltung der Stadt ein umfangreiches Forschungs- und Planungsprogramm aufgelegt, das die Folgen des Klimawandels für die Bevölkerung feststellen und Anpassungsmaßnahmen entwickeln soll.

The Coastal Cities - The example New York: *Like many other coastal cities, New York is exposed to a high risk of extreme weather, which has increased as a result of climate change. This includes in particular storm surges, as the modern-day New York has experienced during Hurricane Sandy in 2012, which has made the endangerment of the city a political issue for the future as well. The threat of flooding from the sea in New York is further promoted by an unusually high sea level rise in global comparison. In addition, as a result of the high building density the city suffers from heat waves, whose frequency and intensity will increase as a result of global warming in the coming decades. In view of this situation, the administration of the city of New York has launched a comprehensive research and planning program to determine the impact of climate change on the population and to develop adaptation measures.*

Megastädte, Küstenstädte, Klimawandel

1950 war New York neben Tokio die einzige Megastadt der Welt, worunter zumeist Metropolregionen mit 10 Mio. Einwohnern und mehr verstanden werden. Gegenwärtig gibt es etwa 33 Megastädte, die vor allem in Asien liegen, mit weltweit rd. 529 Mio. Menschen bzw. 6,9 % der globalen Bevölkerung. Dieser Anteil wird nach Schätzungen der UN bis 2030 auf 8,8 % steigen (UNITED NATIONS 2018), wobei die Bevölkerungszunahme vor allem in Asien und Afrika stattfinden wird (*Abb. 3.2-1*).

Megastädte befinden sich hauptsächlich in niedrig gelegenen Küstengebieten, was sie spürbar gegenüber

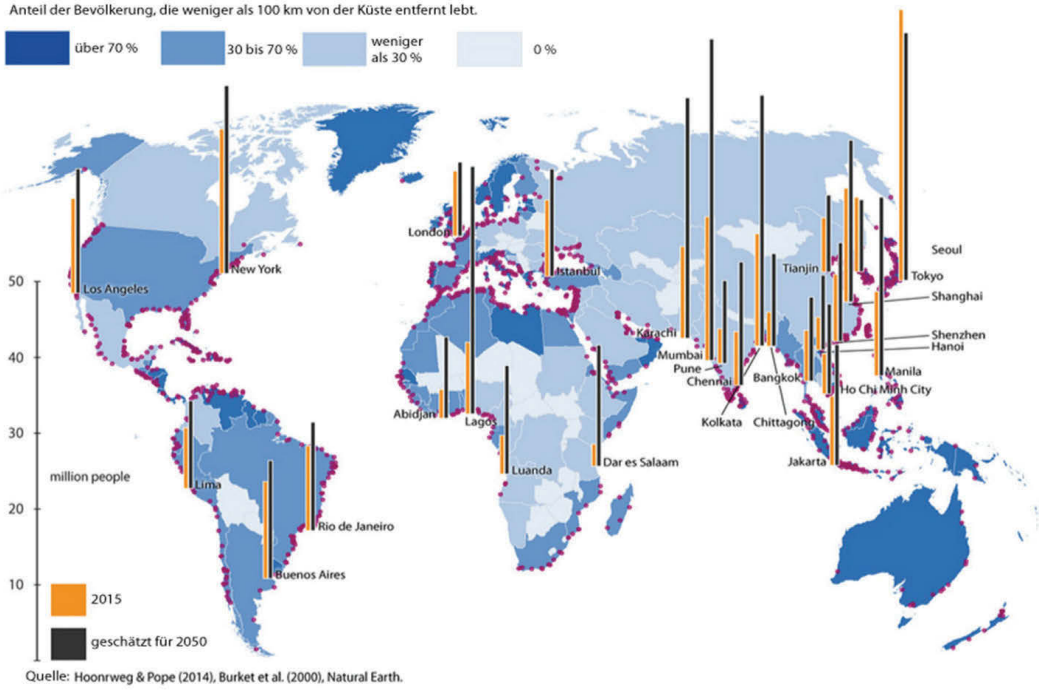


Abb. 3.2-1: *Gegenwärtige und künftige Megastädte in Küstenlage (FLICKR 2016: Population of Coastal Cities, violette Punkte: weitere Küstenstädte; https://www.flickr.com/photos/gridarendal/32236257771/in/album-72157677525189761/; Lizenz: CC BY-NC-SA; ursprgl. GRID-Arendal, Levi Westerveld, http://www.grida.no/resources/8130).*

Naturkatastrophen exponiert. Für den Grenzbereich zwischen Kontinent und Meer und aufgrund der hohen Dichte von Bevölkerung, Gebäuden und Infrastrukturanlagen besteht eine besonders starke Gefährdung durch Meeresspiegeländerungen, Stürme und Überflutungen, die durch eine Absenkung der Landoberfläche infolge hoher Gebäudedichte und Grundwasserentnahme noch erhöht wird. Hinzu kommt wie in allen großen Städten mit dichter Bebauung und dadurch bedingter Ausbildung städtischer Wärmeinseln die intensivere Ausprägung von Hitzewellen im Vergleich zum Umland. Durch Extremereignisse besteht nicht nur ein hohes Risiko für Leib und Leben der Bewohner, sondern auch die Gefahr der Vernichtung großer Vermögenswerte, da hier wichtige Umschlagplätze für zahlreiche Güter, große Industrieanlagen und Gebäude angesiedelt sind. Zu den 20 am meisten durch den Klimawandel gefährdeten Städten weltweit in Bezug auf Menschen und Vermögenswerte zählt neben Mumbai, Guangzhou, Shanghai, Bangkok, Alexandria u.a. auch New York (WBGU 2016). Nimmt man nur die Vermögenswerte als Kriterium, stehen Städte wie Miami, New York, Tokio, New Orleans, Guangzhou und Shanghai ganz oben auf der Gefährdungsliste.

Küstenstädte sind aber nicht nur Betroffene von Wetterextremen. Als wichtige Zentren wirtschaftlicher Aktivitäten sind sie auch in hohem Maße Verursacher von Umweltveränderungen und insbesondere des Klimawandels. Hier laufen wichtige Verkehrswege vom Land, vom Meer und aus der Luft zusammen, die einen hohen Anteil von Treibhausgasemissionen verursachen. Und vielfach konzentrieren sich in großen Hafenstädten auch bedeutende Industrieanlagen und Einrichtungen zur Energieerzeugung der jeweiligen Länder. Das oft im Vergleich zum Hinterland höhere Konsumniveau der Bevölkerung besitzt außerdem einen erheblichen Einfluss auf die Produktion von Konsumgütern nicht nur vor Ort, sondern weltweit und sorgt für deren energieaufwendigen Transport. Küstenstädte sind daher ein wesentlicher Treiber der CO_2-Emissionen und somit durchaus mitverantwortlich für ihre eigene Gefährdung durch einen höheren Meeresspiegel, stärkere Stürme, Überschwemmungen und Hitzewellen (WBGU 2016).

New York als gefährdete Megastadt

In der Metropolregion New York, wozu neben New York City (NYC) auch Teile der Staaten New York, New Jersey, Connecticut und Pennsylvania gehören, lebten im Jahr 2017 rund 20 Mio. Menschen, fast die Hälfte davon allein in NYC (Depietri et al. 2018a). Große Teile der Metropolregion liegen weniger als 5 m über dem mittleren Meeresspiegel. 400.000 Menschen leben in NYC innerhalb des Überflutungsgebietes eines Hochwasserereignisses, das statistisch unter heutigen Bedingungen alle 100 Jahre einmal auftritt (Garner et al. 2017). Die Uferbereiche von NYC erstrecken sich über eine Länge von 837 km, mit wichtigen Verkehrs- u.a. Infrastrukturanlagen wie drei internationalen Flughäfen, Hafenanlagen, U-Bahnen, Tunnel, Brücken, Abwasseranlagen, Kraftwerken etc. (Gornitz et al. 2019). Dennoch galt New York traditionell nicht als eine Stadt, die durch Naturkatastrophen besonders stark gefährdet schien (Depietri et al. 2018b). Diese Sichtweise hat sich jedoch seit den verheerenden Folgen des Hurrikans Sandy im Jahr 2012 geändert (De Blasio 2019), so dass die Stadt heute durchaus als ein bedeutendes Beispiel für die Gefährdung von Küstenstädten durch den Klimawandel gesehen werden kann.

Hurrikan Sandy und die mit ihm verbundenen Stürme und Überflutungen waren ein außergewöhnliches Ereignis, das weltweite Beachtung fand. Über

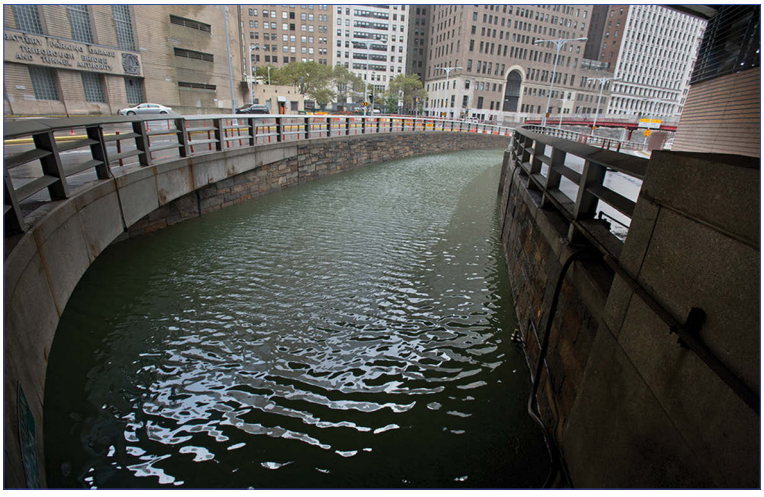


Abb. 3.2-2: *Einfahrt zum Brooklyn-Battery-Straßentunnel, geflutet durch Hurrikan Sandy (Wikimedia Commons: Hugh L. Carey Tunnel during Hurricane Sandy, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hugh_L._Carey_Tunnel_during_Hurricane_Sandy_vc.jpg, Lizenz: CC BY).*

einen längeren Zeitraum von über 100 Jahren gesehen fielen jedoch die meisten Menschen in NYC Hitzewellen zum Opfer, die weniger spektakulär auftreten und bei denen das Sterben von zumeist armen und geschwächten Menschen sich weniger auffällig vollzieht. Allerdings richteten Hurrikane und tropische Stürme den größten Sachschaden an (*Abb. 3.2-3*). Und weitere Gefährdungen gehen auch von den häufig auftretenden, wenn auch weniger folgenreichen Nordoststürmen aus sowie von Hochwasserereignissen durch starke Niederschläge, die der stark versiegelte Boden und die wenig leistungsfähige und veraltete Kanalisation nicht ausreichend aufnehmen können. Die Wetterrisiken, denen New York ausgesetzt ist, drohen einmal vom Meer her, zum anderen aber auch, weil die größte Stadt der USA ein dicht bebauter Ballungsraum ist, der sich von seinem ländlichen Umland signifikant unterscheidet.

Meeresspiegelanstieg

85,5 km² und damit gut ein Zehntel der gesamten Landfläche in NYC liegen im Überschwemmungsgebiet eines Hochwasserereignisses vom Ozean her, das unter heutigen Bedingungen statistisch alle 100 Jahre einmal vorkommt (Gornitz et al. 2019). Wie hoch bei solchen Ereignissen das Wasser aufläuft, hängt nicht nur von den unmittelbaren Ursachen wie der Stärke der Stürme oder dem Zusammenfall von Sturm und Tidehochwasser ab. Eine grundlegende Komponente ist die Veränderung des Meeresspiegels, der sich im globalen Vergleich in den letzten 100 Jahren überdurchschnittlich erhöht hat.

Mit 45,7 cm ist der relative Meeresspiegel am Pegel The Battery an der Südspitze von Manhattan zwischen 1856-2017 etwa doppelt so stark angestiegen wie der mittlere globale Meeresspiegel mit ca. 20 cm zwischen 1900 und 2015 (Gornitz et al. 2019, *Abb. 3.2-4*). Die wichtigste Ursache ist die immer noch anhaltende isostatische Absenkung der Region als Spätfolge des Abschmelzens der Eismassen des Laurentischen Eisschildes auf dem nordamerikanischen Kontinent am Ende der letzten Eiszeit. Die Entlastung der Erdkruste bewirkt dabei eine Anhebung der ehemals mit Eis bedeckten Gebiete, außerhalb davon wie im Raum von New York kommt es durch den Rückfluss des viskosen Erdmantels dagegen zu einer Absenkung. Glazialisostatische Ausgleichsbewegungen spielen auch beim gegenwärtigen Abschmelzen der Eisschilde Grönlands und der Antarktis eine Rolle. Da sie sich aber in zeitlichen Skalen von Jahrtausenden vollziehen, machen sie sich beim bisherigen Meeresspiegelanstieg und auch in den nächsten Jahrzehnten und Jahrhunderten kaum bemerkbar. Der Massenverlust des Grönländischen Eisschildes bewirkt allerdings unmittelbar, dass durch die nachlassende Gravitation die Wassermassen des Ozeans in der Umgebung der Eisschilde absinken, was sich auch noch vor der relativ nahe liegenden amerikanischen Nordostküste geringfügig auswirkt. Das Abschmelzen des Antarktischen Eisschildes hat jedoch durch denselben Prozess wegen der größeren Entfernung einen Anstieg des Meeresspiegels vor New York zur Folge, der die von Grönland ausgehende Wirkung deutlich übertrifft (Slangen et al. 2014). Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Abschwächung der Meridionalen Umwälzzirkulation (AMOC) im Nordatlantik durch eine Erhöhung der Meeresoberflächentemperatur und verstärkte Süßwasserzufuhr. Nach Modellberechnungen führt das zu einer Erwärmung und Erhöhung des

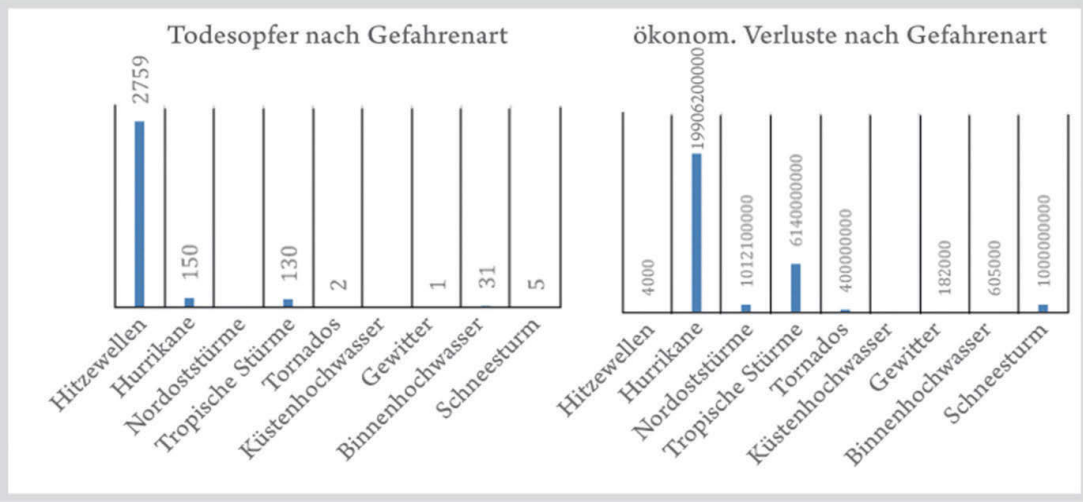


Abb. 3.2-3: *Todesfälle und ökonomische Verluste durch Naturkatastrophen in NYC 1876-2016 (Depietri & Mcphearson 2018b, verändert, Lizenz: CC BY).*

Meeresspiegels im nordwestlichen Atlantik (Krasting et al. 2016). Dieser Prozess ist zwar durch Messungen noch nicht vollständig bestätigt, könnte aber zukünftig von Bedeutung sein.

Neuere Studien gehen davon aus, dass die bisherigen Ursachen für den relativen Meeresspiegelanstieg in New York City auch im nächsten Jahrhundert und darüber hinaus weiterwirken bzw. sich noch verstärken werden (Garner et al. 2017). Die Projektionen des IPCC-Berichts von 2013 zum globalen Meeresspiegelanstieg werden darin als zu konservativ angesehen. Jüngere Beobachtungen zu den Eisschilden von Grönland und der Antarktis sowie Fortschritte in der Eisschild-Modellierung haben die Instabilität vor allem des Westantarktischen Eisschildes betont und lassen bis 2100 einen höheren absoluten Meeresspiegelanstieg erwarten als bisher angenommen. Aufgrund der weiter bestehenden Unsicherheit über die dynamischen Prozesse des Antarktischen Eisschildes wird daher in Studien, die sich mit dem Meeresspiegelanstieg für NYC befassen, für die politische Planung auch ein extremes Szenario projiziert, bei dem davon ausgegangen wird, dass der westantarktische marine (d. h. größtenteils auf dem Meeresboden aufsetzende) Eisschild erheblich an Masse verliert (Gornitz et al. 2019). Dieses als ARIM (*Antarctic Rapid Ice Melt*) bezeichnete Szenario ist zwar bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit bis 2100 von unter 10 % relativ unwahrscheinlich, physikalisch aber durchaus möglich und basiert auf einem aktuellen Verständnis der Prozesse des Antarktischen Eisschildes. Berechnungen auf der Basis des ARIM-Szenarios ergeben bis 2100 eine obere Grenze für den globalen Meeresspiegel von 250 cm gegenüber dem Jahr 2000 (Sweet et al. 2017). Für NYC bedeutet das, dass ein Meeresspiegelanstieg gegenüber der vorindustriellen Zeit um ca. 290 cm bis 2100 im Bereich des Möglichen liegt.

Sturmfluten und Hochwasser

Auch der bisherige Meeresspiegelanstieg allein hat schon dazu geführt, dass sich bei Tidehochwasser Überschwemmungen ohne die Beteiligung von Sturmereignissen in NYC seit den 1950er Jahren mehr als verdoppelt haben. Sie machen sich vor allem in den tiefer gelegenen Stadtteilen rund um die Jamaica Bay am Südrand von Brooklyn und Queens bemerkbar (*Abb. 3.2-6*). Bei Sturmfluten läuft das Hochwasser noch wesentlich höher auf. Die meisten der 22 bekannten historischen Sturmfluten waren durch außertropische Stürme verursacht, vor allem durch Nordoststürme. Sie blieben in den letzten 150 Jahren jedoch unter einen Wasserstand von 2,20 m über dem mittleren Meeresspiegel (Orton et al. 2019).

Die verheerendsten vier bekannten Überschwemmungen (1788, 1821, 1960 und 2012) in New York waren dagegen alle mit einem tropischen Wirbelsturm verbunden. Den höchsten Wasserstand im New Yorker Hafen in den letzten 300 Jahren verursachte mit 3,40 m über dem mittleren Meeresspiegel der Hurrikan Sandy im Jahr 2012 (Orton et al. 2019). Daran beteiligt sind auch lokale Gegebenheiten, die das Hochwasser im Raum New York zusätzlich verstärken. Die Küsten von Long Island und New Jersey bilden einen nach Osten offenen rechten Winkel (*Abb. 3.2-5*). Dadurch kommt es bei einem sich von Osten nähernden Hurrikan zu Staueffekten, und Sturmfluten laufen Richtung NYC deutlich höher auf (Brandon et al. 2015).

Hurrikan Sandy wandelte sich vor seinem Auftreffen auf Land von einem tropischen zu einem außertropischen Sturm. Eine blockierende Hochdrucklage mit starken Nordoststürmen drängte den einstigen Hurrikan, der sich durch die Vereinigung mit Nordostwinden zu einem Supersturm von 1700 km Ausdehnung

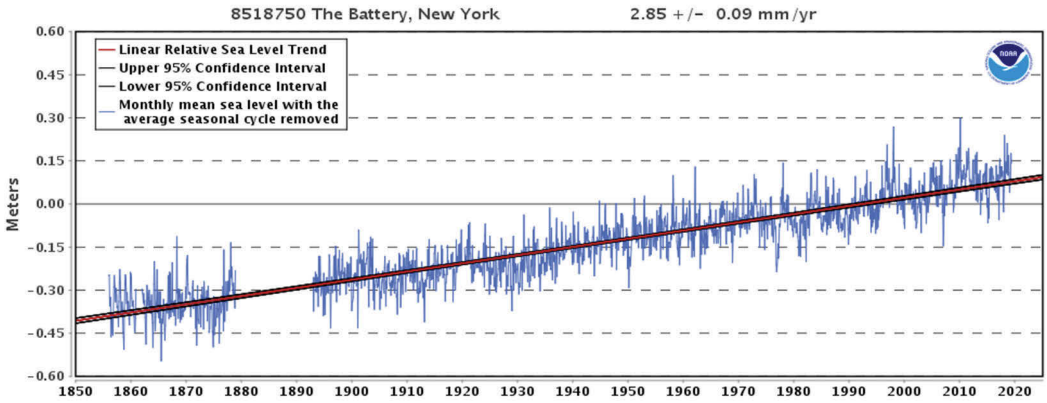


Abb. 3.2-4: *Relativer Meeresspiegelanstieg am Pegel The Battery, NYC, 1856-2018; der mittlere Trend beträgt 2,85 mm/Jahr (NOAA Tides & Currents o.J., public domain).*

auswuchs, Richtung Ostküste der USA. Hinzu kam der zeitliche Zusammenfall der maximalen Sturmflut mit einer Gezeitenflut, die zusammen das Wasser an die Küsten drückten (Kunz et al. 2013). Sandy forderte allein in NYC nicht nur 43 Todesopfer, sondern verursachte auch einen Sachschaden von 19 Mrd. US-Dollar. Teilweise war wochenlang die Stromversorgung unterbrochen. Fünf Krankenhäuser mussten vorübergehend schließen und ihre Patienten evakuieren. Im südlichen Brooklyn, South Queens und Staten Island wurden fast 70.000 Gebäude beschädigt. Stark betroffen war auch die New Yorker Metro; Straßen, Tunnel (*Abb. 3.2-2*), Eisenbahnstrecken und Flughäfen waren vorübergehend überflutet (Depietri et al. 2018a).

Aber nicht nur Menschen und Infrastrukturanlagen sind in NYC durch Extremereignisse wie den Hurrikan Sandy bedroht. Auch die natürlichen Landschaftsformen sind seit Jahrzehnten durch den stetig steigenden Meeresspiegel und Sturmfluten gefährdet (vgl. Gornitz et al. 2019). Diese wirken sich z. B auf die den Küsten vorgelagerten Salzmarschen aus, die u.a. eine wichtige Funktion als Wellenbrecher bei Sturmfluten besitzen. Insbesondere in der Jamaica Bay haben viele Salzmarschen durch den Meeresspiegelanstieg an Fläche verloren. In Verbindung mit hohen Wellen verstärkt der Meeresspiegelanstieg bei starken Stürmen auch die Erosion von Stränden, von denen viele schon gegenwärtig künstlich aufgeschüttet werden müssen. Ein anderes Problem ist das Eindringen von Salzwasser, das sich allmählich den Hudson River aufwärts bewegt und den Salzgehalt des Brackwassers von Lagunen erhöht. Der Hauptgrund sind auch hier der Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten. Daneben verringern höhere Lufttemperaturen und die dadurch bedingte zunehmende Verdunstung sowie gelegentlich auftretende Dürren den Süßwasserabfluss und fördern so ebenfalls das Vordringen der Salzfront. Das stellt nicht zuletzt ein Problem für die Trinkwasseraufbereitung am Hudson River dar.

Durch den fortgesetzten Meeresspiegelanstieg wird bei Sturmfluten im 21. Jahrhundert der Wasserspiegel weiter ansteigen. Überschwemmungen, die in den 2080er Jahren einmal in 100 bzw. in 500 Jahren auftreten werden, werden nach Modellberechnungen eine Wasserhöhe von 3,78 m bzw. 4,91 m erreichen.

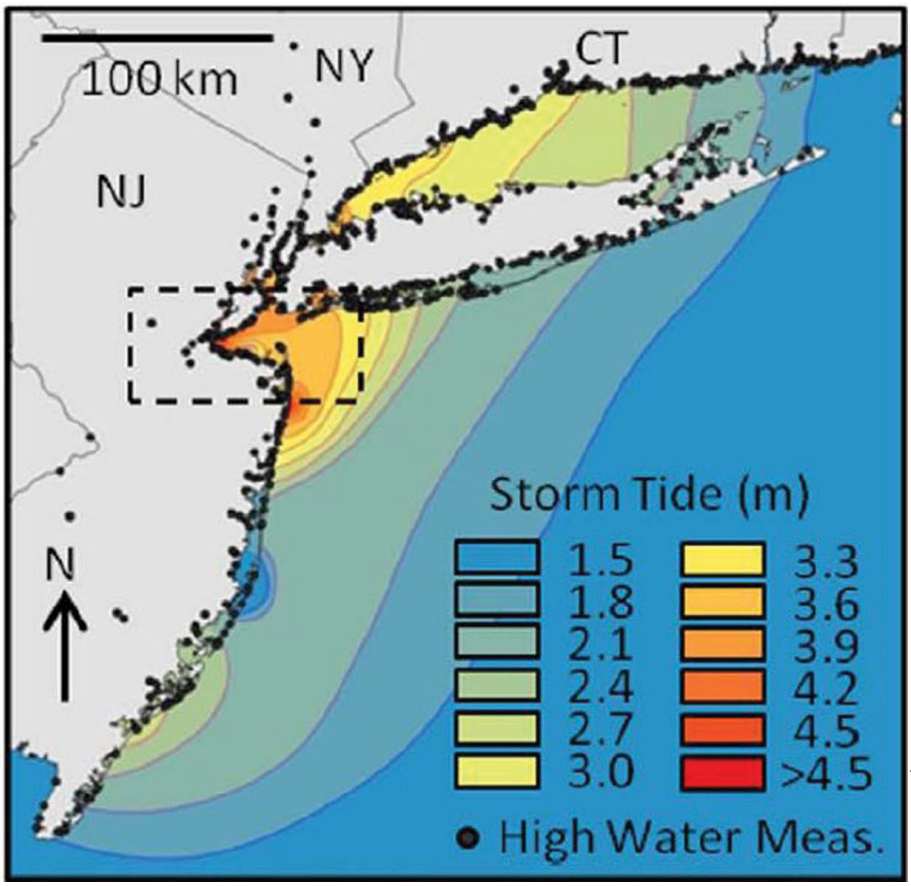


Abb. 3.2-5: *Sturmfluthöhe während des Hurrikans Sandy (Brandon et al. 2014, Lizenz: CC BY-NC-ND).*

Nach dem extremen Meeresspiegel-Szenario ARIM sind in den 2080er Jahren auch 5,5 m möglich. Heutige 100-Jahre-Fluten werden in den 2080ern je nach Szenario alle 8 bis 59 Jahre auftreten. Und falls das ARIM-Szenario wirklich Realität werden sollte, liegt die Wiederkehrperiode eines heutigen 500-Jahre-Hochwassers bei weniger als 5 Jahren. Die täglichen Überschwemmungen durch die Tide könnten gegen Ende des 21. Jahrhunderts dann sogar höher ausfallen als die jüngsten Überflutungen durch den Hurrikan Sandy (Orton et al. 2019). Modellprojektionen zeigen für die nordatlantischen Hurrikane eine Abnahme der Gesamtzahl der Hurrikane, aber eine Zunahme der starken Hurrikane. Außerdem wurde eine Abnahme der westwärts gerichteten Zugbahnen berechnet und ein häufigeres Abdrehen der Zugbahnen nach Osten. Das würde bedeuten, dass künftig weniger tropische Wirbelstürme auf die Küsten der Karibik und Nordamerikas treffen werden. In den selteneren Fällen würden die Hochwasser durch die intensiveren Stürme und das höhere Meeresspiegelniveau allerdings wesentlich weiter ins Land reichende Überschwemmungen bewirken als heute (Walsh et al. 2016).

Hochwasser droht New York City jedoch nicht nur von Meer her, sondern auch durch starke Niederschläge. Die dichte Bebauung begrenzt die Fähigkeit des Bodens, Wasser aufzunehmen und versickern zu lassen und erhöht das Risiko von Überschwemmungen. Die mittlere Oberflächenversiegelung nimmt 72 % der Fläche von NYC ein. Das veraltete Kanalsystem verkraftet höchstens 38 mm Niederschlag pro Stunde. Die Kanalisation ist bei starken Niederschlägen überlastet und es kommt besonders in tiefer gelegenen Gebieten relativ häufig zu Überschwemmungen. Nach neueren Untersuchungen nehmen in NYC die täglichen Niederschlagsmaxima im Herbst zu. Projektionen zeigen jedoch keine klaren Trends (Depietri et al. 2018a).

Hitzewellen

Neben Sturmfluten und Überschwemmungen stellen sommerliche Hitzewellen ein signifikantes Problem für New York City dar. New York liegt mit 40° n.Br. etwa auf derselben Breite wie Madrid und ist daher subtropisch geprägt. Die Stadt steht trotz ihrer Küstenlage zusätzlich unter kontinentalem Einfluss. Die Winter sind daher kalt und die Sommer können bei starker

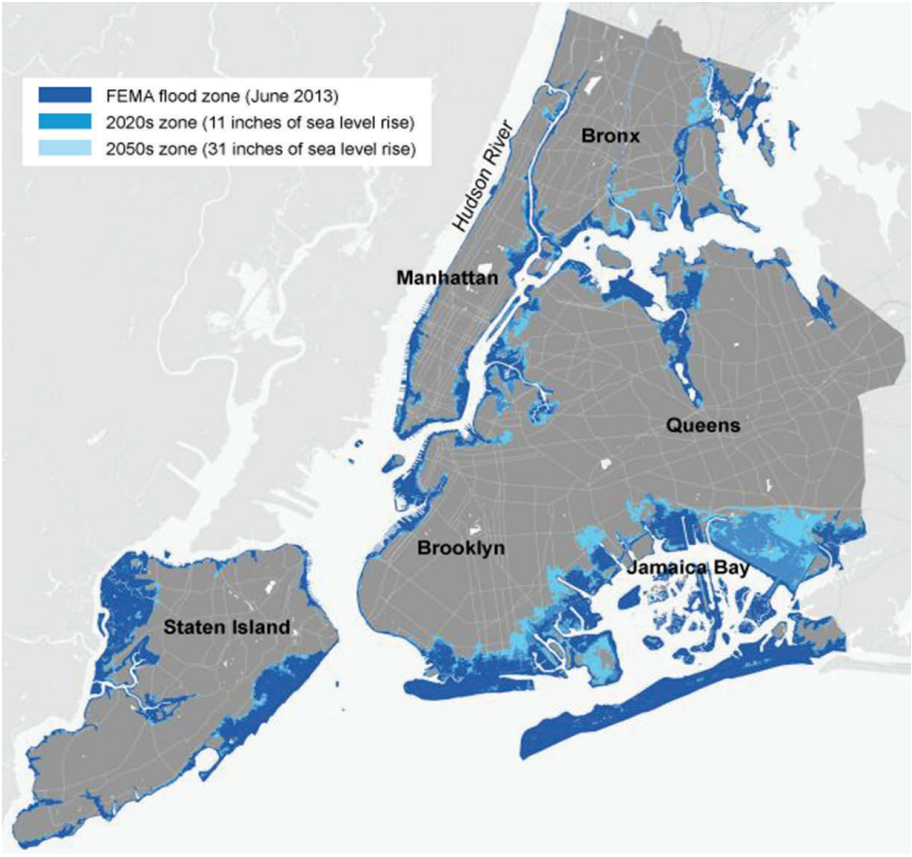


Abb. 3.2-6: *Potenzielle Hochwassergebiete in NYC bei einem 100-Jahres-Hochwasser um 2010 (nach Einschätzung der Federal Emergency Management Agency, FEMA) sowie bei gleicher Wiederkehrperiode in den 2020er (bei einem zusätzlichen Meeresspiegelanstieg von 28 cm) und 2050er Jahren (bei einem zusätzlichen Meeresspiegelanstieg von 79 cm), verändert (Kennedy 2014, public domain).*

Sonneneinstrahlung sehr heiß werden. Die dichte Bebauung und die Größe der Stadt begünstigen außerdem die Ausbildung von städtischen Wärmeinseln, die wiederum Hitzeereignisse verstärken. Besonders in den dicht bebauten Gebieten mit wenigen Grünanlagen sind in NYC die städtischen Wärmeinseln intensiv ausgeprägt. Im Sommer und Herbst liegen hier die Lufttemperaturen um 4 °C über denen der weniger verdichteten Stadtgebiete (Depietri et al. 2018a). Wichtige Ursachen für die Entstehung von städtischen Wärmeinseln sind die Bedeckung des Bodens mit Asphalt und Beton für Verkehrsanlagen und Gebäude. Deren Oberflächen wandeln die einfallende Sonnenstrahlung in sensible und Strahlungswärme um und nehmen so gut wie keine Feuchtigkeit auf. Dadurch kommt es kaum zur Verdunstung, und die daraus resultierenden Abkühlungseffekte bleiben aus. Durch die Lage am Meer erfährt New York allerdings bei Hitzeperioden eine gewisse Abkühlung vom Atlantik her. So liegen die Lufttemperaturen am John F. Kennedy Airport, der direkt an der Jamaica Bay liegt, um gut 1 °C unter denen des Central Parks in Manhattan. Hitzewellen werden durch diesen Temperaturunterschied in ihren stärksten Ausprägungen teilweise nach Westen und Norden in Richtung New Jersey und Bronx abgedrängt (Gonzales et al. 2019). Wie einige Untersuchungen gezeigt haben, wird der Seewind jedoch gerade bei Hitzewellen durch westliche Winde vom Land her häufig blockiert (Ramamurthy et al. 2017).

Die mittleren Sommertemperaturen zeigen in New York City einen klaren Aufwärtstrend (*Abb. 3.2-7*). Als Hitzewellen werden für NYC mindestens drei aufeinanderfolgende Tage mit einer Lufttemperatur von über 32 °C definiert (NOAA o.J.). Größere frühere Hitzewellen ereigneten sich 1966, 1972 mit 253 zusätzlichen Toten an einem Tag, 2006 mit 46 Toten und 2013 mit 26 Toten. Die Anzahl der Opfer durch Hitzewellen ist seit Beginn des 20. Jahrhunderts rückläufig, was durch die bessere Anpassung vor allem durch die Nutzung von Klimaanlagen bedingt ist (Depietri et al. 2018a). Projektionen nach dem Szenario RCP8.5 zeigen, dass die Anzahl der Hitzewellen wahrscheinlich um jährlich eine Hitzewelle alle 20 Jahre bis 2060 zunehmen wird. Die geringe Steigerung in der Anzahl ist dadurch zu erklären, dass die Hitzewellen um 2 Tage in 20 Jahren länger werden, wodurch es zur Verschmelzung mehrerer Hitzewellen zu einer kommen kann. Deutlicher nimmt nach dem Szenario RCP8.5 zwischen 1971-2000 und dem Ende des Jahrhunderts die Hitzewellen-Intensität (Mittel der Maximum-Temperaturen eines Ereignisses) von 34 °C auf 35-37 °C zu (González et al. 2019).

Im Zeitraum 1997-2006 war die Sterblichkeit an extrem heißen Tagen im gesamten Stadtgebiet von NYC um 4 % im Vergleich zu allen Tagen in der war-

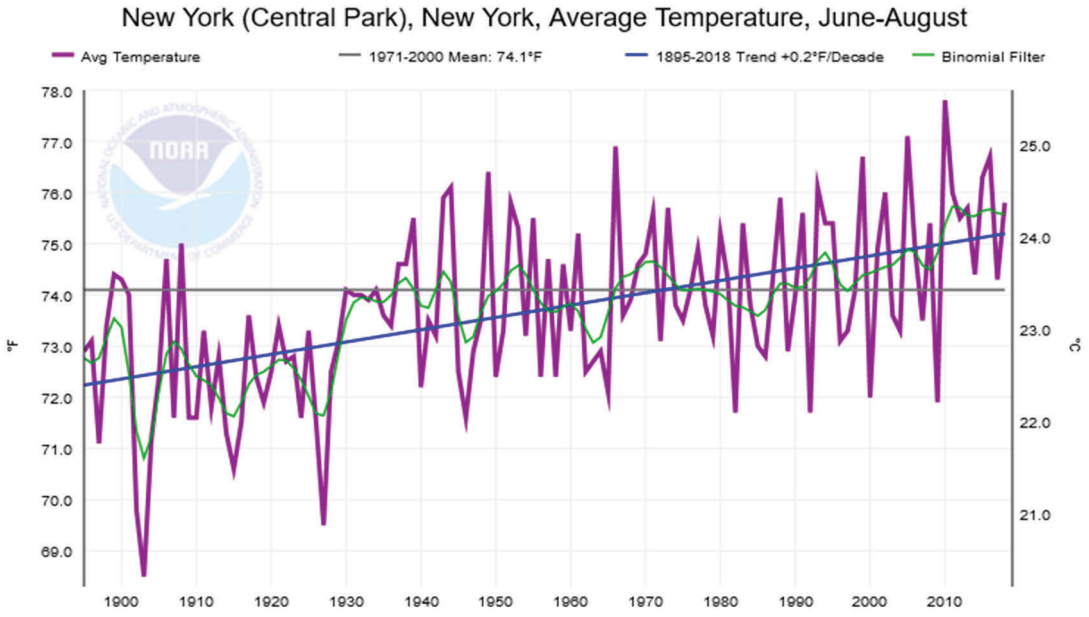


Abb. 3.2-7: *Mittlere Sommertemperaturen (Juni-August) 1895-2018 New York, Central Parc, Angaben in Grad Fahrenheit (links) und Grad Celsius (rechts) (NOAA, National Center for Environmental Information: City Time Series, https://www.ncdc.noaa.gov/cag/city/time-series, Lizenz: public domain).*

men Jahreszeit erhöht. Die zusätzliche Sterblichkeit während Hitzewellen war allerdings nicht gleichmäßig über die Stadt verteilt. Es gab höhere Sterblichkeitsraten in südlichen und westlichen Teilen der Bronx, im nördlichen Manhattan, im zentralen Brooklyn und im östlichen Midtown Manhattan. Diese Gebiete weisen im Mittel schlechtere Wohnbedingungen, ein geringes Einkommen und einen hohen Anteil an Afro-Amerikanern auf. Außerdem gibt es in solchen Vierteln auch wenige Grünanlagen, eine hohe Bodenversiegelung und dadurch höhere Bodentemperaturen sowie einen geringeres Maß an Zugang zu Klimaanlagen im Vergleich zu anderen Stadtgebieten. Bei höherer Pflanzenbedeckung, einem größeren Anteil von Weißen und höherem Einkommen sowie einer größeren Verbreitung von Klimaanlagen waren die Mortalitätsraten deutlich niedriger (Klein Rosenthal et al. 2014). Insbesondere konnten diese Zusammenhänge bei der Sterblichkeit von Senioren ab 65 Jahren während sehr heißer Tage festgestellt werden (*Abb. 3.2-8*).

Schluss: Was tun?

Die Verantwortlichen in New York City waren sich schon früh der Gefährdung ihrer Stadt durch Wetterextreme bewusst und haben bereits am Ende des 19. Jahrhunderts Maßnahmen gegen Hitzewellen zum Schutz vor allem der ärmeren Bevölkerung ergriffen. Durch die Einrichtung von zentralen Kühlräumen mit Klimaanlagen wurde diese Tradition in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts weiterentwickelt. Weniger vorbereitet ist NYC auch heute noch auf Hochwasser, die den Küstengebieten zwar selten, aber dann um so gefährlicher von Hurrikanen drohen (Depietri et al. 2018a, Coch 2015). Seit Hurrikan Sandy hat sich die Stadt mit dem bereits 2008 gegründeten New York City Panel on Climate Change (De Blasio 2019) jedoch verstärkt darum

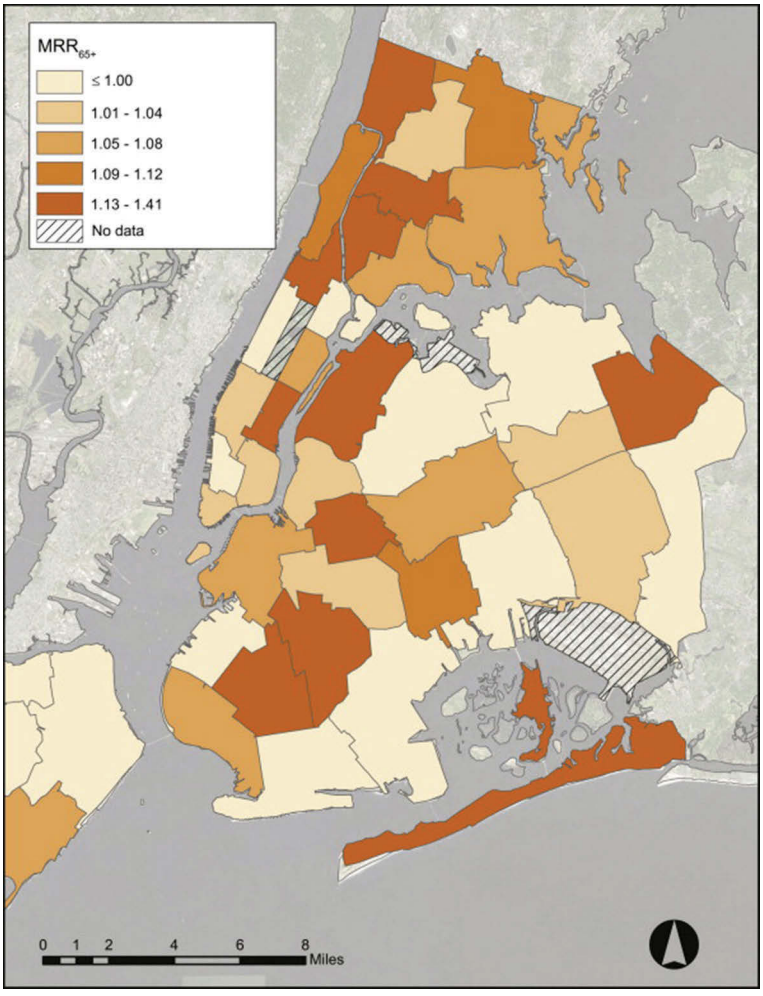


Abb. 3.2-8: *Sterblichkeitsrate bei Senioren über 65 Jahren (MRR65+) in New Yorker Stadtteilen während sehr heißer Tage (ab 38 °C) während aller Tage im Mai-September 1997-2006. 1.13 in der Legende bedeutet eine um 13 % höhere Sterblichkeitsrate als im Mittel (Klein Rosenthal et al. 2014; Lizenz: CC BY-NC-SA).*

bemüht, das Risiko durch den Klimawandel für ihre nahezu 10. Mio. Einwohner und die wichtigsten Infrastrukturanlagen zu erforschen und für die Zukunft möglichst realistisch zu projizieren. Gleichzeitig wurden Anpassungsstrategien für eine widerstandsfähige Stadtentwicklung ausgearbeitet und einige Maßnahmen in Reaktion auf Sandy umgesetzt.

Eine wesentliche Unterstützung wird dabei in der Kooperation mit der Bevölkerung in den gefährdeten Stadtteilen sowie mit anderen US-Städten wie Boston und Philadelphia gesehen (Solecki & Rosenzweig 2019). Als wichtig hat sich aber auch die Zusammenarbeit auf internationaler Ebene erwiesen, so z.B. mit Kopenhagen bei Hochwasserproblemen. Eine Maßnahme, die daraus hervorging, war etwa, asphaltierte Flächen durch Grasbewuchs zu ersetzen und Räume für das vorübergehende Aufstauen von Wasser zu schaffen. Eine ähnliche Zusammenarbeit gab es auch mit London. Solche Partnerschaften könnten zur Stärkung der Widerstandsfähigkeit von Städten gegen den Klimawandel einen wesentlichen Beitrag leisten. Die Mittel dafür stehen allerdings Küstenstädten wie New York oder Kopenhagen in einem erheblichen größeren Ausmaß zur Verfügung als Küstenmetropolen in sich entwickelnden Ländern wie Mumbai, Alexandria oder Jakarta. Die Chancen einer erfolgreichen Klimaanpassung werden aber auch für New York nur dann groß sein, wenn das Klimarisiko klein gehalten wird. Und das ist eine globale Aufgabe.

Literatur

BRANDON C. M., J. D. WOODRUFF, J. P. DONNELLY & R. M. SULLIVAN (2014): How Unique was Hurricane Sandy? Sedimentary Reconstructions of Extreme Flooding from New York Harbor, Scientific Reports 4. *https://doi.org/10.1038/srep07366.*

COCH N. K. (2015): Unique Vulnerability of the New York-New Jersey Metropolitan Area to Hurricane Destruction, Journal of Coastal Research 31, 196-212, *https://www.jstor.org/stable/43290194.*

DE BLASIO B. (2019): New York City Panel on Climate Change 2019 Report, Foreword, Ann. New York Acad. Sci., doi: 10.1111/nyas.14061.

DEPIETRI Y., K. DAHAL & T. MCPHEARSON (2018a): Multi-hazard risks in New York City, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 3363-3381, *https://doi.org/10.5194/nhess-18-3363-2018.*

DEPIETRI Y. & T. MCPHEARSON (2018b): Changing urban risk: 140 years of climatic hazards in New York City, Clim. Change, 148, 1-14, doi:10.1007/s10584-018-2194-2

GARNER A. J., M. E.MANN, K. E. EMANUEL, et al. (2017): Impact of climate change on New York City's coastal flood hazard: increasing flood heights fromthe preindustrial to 2300 CE. Proc.Natl. Acad. Sci. USA 114: 11861-11866.

GONZÁLEZ J. E., L. ORTIZ, B. K. SMITH, N. DEVINENI et al. (2019): New York City Panel on Climate Change 2019 Report, Chapter 2: New Methods for Assessing Extreme Temperatures, Heavy Downpours, and Drought. Ann. N.Y. Acad. Sci., 1439: 30-70. doi:10.1111/nyas.14007.

GORNITZ V., M. OPPENHEIMER, R. KOPP, P. ORTON eta. (2019): New York City Panel on Climate Change 2019 Report, Chapter 3: Sea Level Rise. Ann. New York Acad. Sci., 1439, 71-94, doi:10.1111/nyas.14006.

KENNEDY C. (2014): Future Flood Zones for New York City. *https://www.climate.gov/news-features/featured-images/future-flood-zones-new-york-city.*

KLEIN ROSENTHAL J., P. L. KINNEY & K. B. METZGER (2014): Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997-2006, Health Place, 30, 45-60, doi:10.1016/j.healthplace.2014.07.014.

KRASTING, J.P., J.P. DUNNE, R.J. STOUFFER, and R.W. HALLBERG (2016): Enhanced Atlantic sea level rise relative to the Pacific under high carbon emission rates. Nat. Geosci. 9: 210-214.

KUNZ M., B. MÜHR, T. KUNZ-PLAPP, J. E DANIELL et al. (2013): Investigation of superstorm Sandy 2012 in a multi-disciplinary approach, Natural Hazards and Earth System Sciences, 13, 2579-2598.

NOAA TIDES & CURRENTS (o.J.): Relative Sea Level Trends, The Battery, New York. *https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750.* Abgerufen 9.9.2019.

NOAA NATIONAL WEATHER SERVICE (o.J.): Central Park Heat Wave Climatology. *https://www.weather.gov/okx/nycheatwave.* Abgerufen am 24.7.2019.

ORTON P., N. LIN, V. GORNITZ, B. COLLE et al. (2019): New York City Panel on Climate Change 2019 Report Chapter 4: Coastal Flooding. Ann. New York Acad. Sci., 1439, 95-114, doi:10.1111/nyas.14011.

RAMAMURTHY P., J. GONZALEZ, L. ORTIZ, et al. (2017): Impact of heatwave on a megacity: an observational analysis of New York City during July 2016. Environ. Res. Lett. 12. *https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6e59.*

SLANGEN A. B. A., M. CARSON, C. A. KATSMAN, R. S. W. VAN DE WAL et al. (2014): Projecting twenty-first century regional sea level changes. Clim. Change. *https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9.*

SOLECKI W. & C. ROSENZWEIG (2019): New York City Panel on Climate Change 2019 Report Chapter 9: Perspectives on a City in a Changing Climate. Ann. New York Acad. Sci., 1439, 280-305, doi:10.1111/nyas.14011.

SWEET W. V., R. E. KOPP, C. P. WEAVER, et al. (2017): Global and regional sea level rise scenarios for the United States. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083.

UNITED NATIONS (Department of Economic and Social Affairs, Population Division) (2018): The World's Cities in 2018 - Data Booklet (ST/ESA/ SER.A/417).

WALSH K.J., J. MCBRIDE, P. J KLOTZBACH, S. BALACHANDRAN et al. (2016): Tropical cyclones and climate change. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 7(1), DOI:10.1002/wcc.371.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte, *https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/der-umzug-der-menschheit-die-transformative-kraft-der-staedte. A*bgerufen am 24.7.2019.

Kontakt:
Dr. Dieter Kasang
Deutsches Klimarechenzentrum
Kasang@dkrz.de

Kasang D. (2019): Küstenstädte - das Beispiel New York. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 82-90. online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.12.

3.3 Städtische Agglomerationen in Flussdeltagebieten

Jürgen Scheffran & P. Michael Link

Flussdeltas und dort liegende städtische Agglomerationen sind den Auswirkungen des Klimawandels und den Folgen intensiver menschlicher Nutzung ausgesetzt. Ein steigender Meeresspiegel kann in Flussdeltas zu Inundation, Überflutung, Salzwassereinträgen, Verlusten von Feuchtgebieten oder landwirtschaftlichen Nutzflächen führen. All diese Auswirkungen beeinträchtigen die menschliche Nutzung der Deltaregionen und können die lokale Widerstandsfähigkeit gegen den Klimawandel reduzieren. Die Erfahrung zeigt, dass proaktive Maßnahmen einen effektiveren Schutz bieten als reaktive. Mit Hilfe eines integrativen Forschungsansatzes lassen sich die Konsequenzen von Umweltveränderungen in Flussdeltas systematisch erforschen. Beispiele unterschiedlicher Flussdeltas geben einen Überblick über die unterschiedlichen Möglichkeiten, um ein effektives Küstenmanagement in Deltaregionen in Zeiten des Klimawandels zu etablieren.

***Urban agglomerations in River Deltas:** River deltas and urban agglomerations located there are particularly exposed to the consequences of climate change and the pressure from local human utilization. Impacts of growing sea level rise may include inundation, submergence, saltwater intrusion, loss of wetlands or agricultural land. All these effects can substantially interfere with human uses of the deltaic regions and can have adverse implications on local adaptive capacity and resilience to climate change. Experience shows that proactive approaches to adaptation are generally more effective than reactive approaches. An integrated framework is developed to allow systematic research on the impacts of climate change on river deltas. Examples are provided of different kinds of river deltas to outline the possibilities that exist for effective coastal management in delta regions in times of climate change.*

Flussdeltas: Klimawandel, Meeresspiegel und andere Herausforderungen

Flussdeltas sind Regionen, die in Zeiten des Klimawandels besonders stark von Änderungen der Umweltbedingungen betroffen sind. Die Mündungsgebiete großer Flusssysteme sind nicht nur verwundbar gegenüber den physischen Auswirkungen des Klimawandels, die sowohl von Landseite durch Änderungen in der Hydrologie der Flüsse als auch von Ozeanseite durch Stürme und Meeresspiegeländerungen auf die Deltas wirken. Hinzu kommen auch in zunehmendem Maße gesellschaftliche Effekte, die insbesondere in urban geprägten Flussdeltas den Umweltstress weiter erhöhen. Flussdeltas weisen aufgrund ihrer besonderen Lage am Übergang von limnischen zu marinen Bedingungen eine besondere ökologische Sensitivität auf, wodurch sie prädestiniert sind, zu Brennpunkten (*Hot Spots*) der Auswirkungen des Klimawandels zu werden.

Mögliche Veränderungen der Umweltbedingungen in Flussdeltas hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab. Diese umfassen physikalische Größen wie Temperatur, Salzgehalt, Strömungsrichtung und -geschwindigkeit bis hin zu gesellschaftlichen Parametern wie Ressourcennutzung, Sedimenteintrag oder -abbau, Beeinträchtigung der Wasserqualität, Mülleintrag etc. Diese Faktoren wirken nicht nur individuell auf die Flussdeltas. Ihre Interaktion kann zusätzlich noch zu sekundären Effekten führen, die sich ebenfalls auf die Exponiertheit der Deltaregionen gegenüber Überflutungen, Wassermangel, Dürren oder Meeresspiegeländerungen auswirken.

Flussdeltas unterscheiden sich deutlich, je nachdem wo sie sich befinden, wie groß das sie speisende Flusssystem ist und welche Art der menschlichen Landnutzung dominiert. Dadurch müssen die Auswirkungen von Umweltveränderungen individuell betrachtet werden, Verallgemeinerungen sind oftmals nur schwer möglich. Die Konsequenzen eines steigenden Meeresspiegels können Überflutungen von der Meeresseite, das Absinken unter den Meeresspiegel, Salzwassereinträge, der Verlust küstennaher Feuchtgebiete oder eine abnehmende Qualität landwirtschaftlicher Nutzflächen in der Deltaregion umfassen.

Von der Landseite aus können derartige Veränderungen die menschliche Nutzung der Deltagebiete stark beeinträchtigen, insbesondere bei Landnutzung und Wasserverbrauch sind Einschränkungen zu erwarten, wenn die Verfügbarkeit von Süßwasser aus den Flüssen zurückgeht. Außerdem können Möglichkeiten zur Energiegewinnung aus fossilen und regenerativen Quellen eingeschränkt und die Entwicklung von Küstenzonen behindert werden. Insbesondere in Flussdeltas, die bereits stark urbanisiert sind, mag ein Rückgang bei der Küstenentwicklung ein wünschenswertes Ziel sein, allerdings ist dann ein effektives Management der vorhandenen Deltanutzung notwendig, um die Anpassungsfähigkeit der Region gegenüber dem Klimawandel zu bewahren bzw. zu erhöhen.

Der Klimawandel und ein Anstieg des Meeresspiegels bringen in Flussdeltas diverse direkte Auswirkungen auf die Ökosysteme mit sich, was zu Verschiebungen in der Artenzusammensetzung und ggf. zu einer Verringerung der Biodiversität führen kann. Auch Infrastruktur und Ressourcen, die für den Menschen von Bedeutung sind, können Risiken ausgesetzt sein, und langfristig zu Bedrohungen für Leib und Leben führen, die schließlich Migration, Umsiedlung und Vertreibung aus den Deltaregionen zur Folge haben. Um diesen möglichen Konsequenzen vorzubeugen oder sich zumindest in adäquater

Weise daran anzupassen, ist es notwendig, die Verwundbarkeit der Deltaregionen in Hinblick auf die genannten Umweltveränderungen zu ermitteln und sie mit deren Anpassungsfähigkeit zu vergleichen.

Die intensive Nutzung von Flussdeltas in Zusammenhang mit steigenden Einwohnerzahlen in Deltaregionen hat zur Folge, dass Ressourcengewinnung, Sedimentabbau, Landnutzungsänderungen und ein relativer Anstieg des Meeresspiegels weltweit zu einer Verschlechterung der Umweltbedingungen in Flussdeltas führen (IPCC 2014). In 85% der größten Flussdeltas dieser Erde gab es seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts starke Überflutungen, bei denen rund 260.000 km² Landfläche zumindest zeitweise untergegangen sind. Derartige Entwicklungen werden sich voraussichtlich in Zukunft fortsetzen und ggf. noch verstärken, insbesondere, wenn wachsende Einwohnerzahlen und eine fortschreitende wirtschaftliche Entwicklung in deltanahen Städten zu einem weiteren Anstieg der Wassernutzung aus den Flusssystemen führen. Diese Herausforderungen wirken auf alle großen Flussdeltas der Erde, abhängig von ihrer geographischen Lage (*Tab. 3.3-1*). Hierzu gehören Staudämme und die Kanalisierung dieser Wassersysteme, die zu Erosion und Verfall führen, der Rückgang des Sedimenttransports durch die Flüsse zu den Deltas und Bodensenkungen durch die Entwässerung in vielen Deltaregionen.

Urbanisierung in Flussdeltas: Verwundbarkeit und Risiken

Die besonderen Eigenschaften von Flussdeltas machen sie attraktiv für städtische Ansiedelungen. Die Verbindung von reichlich verfügbarem Wasser, landwirtschaftlich fruchtbaren Flussauen, Häfen und Güterproduktion ermöglicht vielfältige wirtschaftliche Aktivitäten und Handelsbeziehungen, die zu wachsendem Reichtum und menschlichem Wohlergehen in der ganzen Deltaregion führen. Daher liegen einige der größten Metropolen und Megastädte der Welt in Flussdeltas. Jüngste Projektionen zeigen, dass bis 2050 rund drei Viertel der Weltbevölkerung in Städten leben werden, davon ein großer Anteil in Deltas. Mehr als ein Viertel der 136 größten Hafenstädte liegen in Deltaformationen (Campanella 2010). In einer Stichprobe von 40 Deltas, darunter alle großen Megadeltas, leben fast 300 Millionen Menschen (Ericson et al. 2006), mit einer durchschnittlichen Bevölkerungsdichte von etwa 500 Einwohnern/km². Die meisten Menschen wohnen im Ganges-Brahmaputra-Delta, die höchste Einwohnerdichte gibt es im Nildelta.

Während die globale Urbanisierung Wachstum, Wohlstand, Entwicklung, Emanzipation und kulturelle Aktivitäten ermöglicht, sind viele expandierende städtische Deltagebiete gegenüber Umweltveränderungen verwundbar, wodurch sich die positiven Effekte umkehren können, wenn Städte nicht widerstandsfähiger gegenüber den mehrfachen zukünftigen Herausforderungen (multi-hazard risks) werden (IPCC 2019). Die Wechselwirkungen zwischen einer raschen Verstädterung und Klimastress an der Schnittstelle von Flüssen und Meer machen städtische Deltas besonders anfällig gegenüber dem Klimawandel, der große Herausforderungen für die Lebensfähigkeit und Stabilität von Deltaregionen darstellt. Die Kombination von langfristigem Meeresspiegelanstieg mit extremen Wetterereignissen wie Dürren, Stürmen und Überschwemmungen von Land- und Meerseite kann in bevölkerungsreichen Gebieten schwerwiegende Folgen haben. Schnelle Änderungen in der Land- und Wassernutzung und urbanes Wachstum setzen Städte, Gesellschaften und Menschen unter Druck. Während der Anstieg des Meeresspiegels

Tab. 3.3-1: *Vergleich der Problemfaktoren in ausgewählten Flussdeltas (adaptiert von Ovink 2015). Legende: (1) relativ kleines Problem, jetzt und in naher Zukunft; (2) derzeit kleines Problem, das aber in naher Zukunft zunimmt; (3) derzeit bereits großes Problem, zukünftiger Trend unsicher; (4) derzeit bereits großes Problem, das in naher Zukunft zunimmt.*

Flussdelta/Probleme	Druck auf den Raum	Überflutungs-Verwundbarkeit	Trinkwasser-Mangel	Alternde oder inadäquate Infrastruktur	Küsten-erosion	Verlust von Umwelt-Qualität und Biodiversität
Yellow River (China)	2	1	2	1	3	3
Ganges-Brahmaputra (Bangladesh)	2	4	4	2	1	3
Ciliwung (Indonesien)	4	4	2	2	4	4
Nil (Ägypten)	4	1	4	4	2	2
Rhein (Niederlande)	3	2	2	3	2	1
Mississippi (USA)	1	4	1	4	4	4
California Bay (USA)	2	4	4	3	1	3

schon jetzt die Lebensfähigkeit niedrig gelegener urbaner Gebiete bedroht, wird sich dieser Trend bis Ende des Jahrhunderts noch deutlich verstärken (IPCC 2014).

Integrierte Modelle, unter Verwendung digitaler Geländemodelle und Daten über die Bevölkerungsverteilung, zeigen den Zusammenhang zwischen natürlichen und menschgemachten Faktoren und Prozessen. Hierzu gehören Simulationen des Meeresspiegelanstiegs, Schätzungen über Sedimentbildung, Flussumleitungen und Staudämme sowie beobachtete Bodenabsenkungen und -anhebungen (Ericson et al. 2006). Analysen ergaben, dass ein Großteil der Bevölkerung in Deltas durch Küstenerosion und Landverluste, verringerten Sedimenttransport der Flüsse und den Anstieg des Meeresspiegels gefährdet ist. Allein in drei Megadeltas (Ganges-Brahmaputra, Mekong und Nil) wären mehr als eine Million Menschen bis 2050 direkt betroffen, in weiteren 9 Deltas wahrscheinlich jeweils mehr als 50.000 Menschen und in weiteren 12 Deltas jeweils mehr als 5.000 (*Abb. 3.3-1*)

Die am stärksten gefährdeten Städte in Deltas im Jahr 2050 wären, gemessen als Anteil der Verluste des Bruttoinlandsproduktes (BIP), Guangzhou, Mumbai, Kolkata, Guayaquil, Shenzen, Miami, Tianjin, New York, Ho-Chi-Minh-Stadt und New Orleans. In absoluten Zahlen steht Miami mit 278 Milliarden Dollar an erster Stelle, gefolgt von Guangzhou, New York, New Orleans, Hongkong, Mumbai, Osaka-Kobe, Shanghai, Amsterdam und Ho-Chi-Minh-Stadt (Ovink 2015). Ohne grundlegende Änderungen könnten bis 2050 etwa zwei Milliarden und bis 2080 vier Milliarden Menschen betroffen sein. Um die Risiken zu mindern, sind Schutz- und Anpassungsmaßnahmen erforderlich, die eine große Anzahl von Menschen sowie wichtige Infrastrukturen und Vermögenswerte schützen. Wenn das Leben und Vermögen der Bevölkerung in Deltastädten nicht gesichert wird, kann dies zu sozialen Störungen, Vertreibungen und Fluchtbewegungen führen und das Risiko von Spannungen und Konflikten in den betroffenen Gebieten erhöhen, insbesondere in Gebieten politischer Instabilität. Streitigkeiten über Seegrenzen, Hoheitsgewässer und Seewege können zum Auslöser für internationale Konflikte werden.

Anpassung und Resilienz

Die Möglichkeiten, auf die Variabilität der Wassermenge in Flüssen sowie auf lokale Meeresspiegelschwankungen adäquat zu reagieren, hängen von einer Vielzahl sozio-ökonomischer Faktoren ab. Daraus ergibt sich eine große Bandbreite an Anpassungsfähigkeiten an Umweltveränderungen. Gerade in urban geprägten Flussdeltas spielt die Anpassung eine wichtige Rolle, um wirtschaftlichen Schaden abzumildern und Alternativen anzubieten, die menschliches Wohlergehen und individuelle Sicherheit gegenüber Umweltänderungen ermöglichen. Ziel ist es, selbst bei fortschreitendem Klimawandel die wichtigsten Grundlagen für ein selbstbestimmtes Leben in Würde und Freiheit zu erhalten. Die Resilienz von Metropolregionen in Flussdeltaregionen ist ein Indikator für die Fähigkeit, mit Gefährdungen umzugehen und die wichtigsten Funktionen und Strukturen zu bewahren oder wiederherzustellen, ohne das Potential für Fortschritt oder Transformation einzuschränken (Aerts et al. 2014).

Dabei stehen der Mensch und sein Umgang mit der Umwelt in den Deltaregionen im Mittelpunkt. Verwundbarkeit und Resilienz von Metropolregionen in



Abb. 3.3-1: *Relative Verwundbarkeit von Küstendeltas entsprechend der Bevölkerung, die durch derzeitige Trends des Meeresspiegels bis 2050 betroffen ist: Extrem >1 Million; Hoch = 1 Million bis 50,000; Medium = 50,000 bis 5,000 (Quelle: IPCC 2014 S. 227).*

Flussdeltas hängen in erheblichem Maße von menschlichen Wahrnehmungen, Reaktionen und Interaktionen zwischen Deltabewohnern ab. Anpassung betrifft individuelle Maßnahmen von Stakeholdern oder kollektive Handlungen von politischen Institutionen und sozialen Netzwerken, die juristische und administrative Schritte umfassen und mit Konflikt oder Kooperation verbunden sind. Dabei lassen sich proaktive und reaktive Maßnahmen unterscheiden, wobei ersteren eine höhere Effizienz zugebilligt wird (z.B. Küstenschutz oder institutionelle Mechanismen).

Es reicht nicht, die Folgen des Klimawandels und direkte Eingriffe des Menschen in Fluss- und Deltasysteme abzuschwächen oder zu »reparieren«. Eher geht es um den Übergang zu einem integrierten Systemansatz, bei dem langfristige, umfassende Strategien mit kurzfristigen innovativen Interventionen verbunden werden. Um die Widerstandsfähigkeit der Gesellschaft in Deltas zu verbessern, müssen Anpassungspläne mit lokalen Bedürfnissen in Einklang gebracht werden, unter Einbeziehung relevanter Stakeholder und durch eine Verlagerung oder Aufteilung der Zuständigkeiten von den Zentralregierungen auf lokale Behörden, private Institutionen und Einwohner. In einem integrierten Ansatz werden Entwicklung und Schutz von Städten in Deltas kombiniert, basierend auf den Grundsätzen der Sicherheit und Qualität des Lebens, der Umwelt und der Wirtschaft.

Ein Fokus von Anpassungsmaßnahmen sind die Wasserversorgung und der Hochwasserschutz, die durch Raumplanung und Gestaltung des ländlichen Hinterlandes und der ökologischen Bedingungen in Flusseinzugsgebieten beeinflusst werden, um die Versorgungssicherheit und Qualität des Wassers zu gewährleisten. Vorgelagerte Maßnahmen zur besseren Steuerung der Wasser- und Sedimentflüsse im Flussgebiet können zum Erhalt von Mangroven-Ökosystemen beitragen, die für Wasserqualität, nachhaltige Holz- und Fischproduktion sowie für Erholung und Bewahrung der biologischen Vielfalt sorgen. Mangroven schützen die Küste vor Sturmfluten, aber sie können nicht mit dem Anstieg des Meeresspiegels Schritt halten, wenn nicht genügend Sedimentquellen flussaufwärts vorhanden sind (vgl. *Abb. 3.3-2*).

Viele Deltas können ihre große Bevölkerung nicht ohne eine funktionierende Infrastruktur schützen. Menschen, die in Deltas leben, haben sich über längere Zeiträume an die sich ständig ändernden Bedingungen dieser Systeme angepasst, einschließlich saisonaler Zyklen, die das Delta-Leben prägen. Unter den vielfältigen Belastungen des Anthropozäns dürften historisch gewachsene Konzepte in Zukunft nicht ausreichen, sondern eine Intensivierung und Umgestaltung mit Hilfe technischer Ansätze und Governance-Regelungen erfordern. Hierzu gehören Pläne, die den Anpassungsherausforderungen in Deltas gerecht werden (Seijger et al. 2017). Die Überschwemmung von New Orleans durch den Wirbelsturm Katrina im Jahr 2005 fand ihren Niederschlag im Delta-Plan der

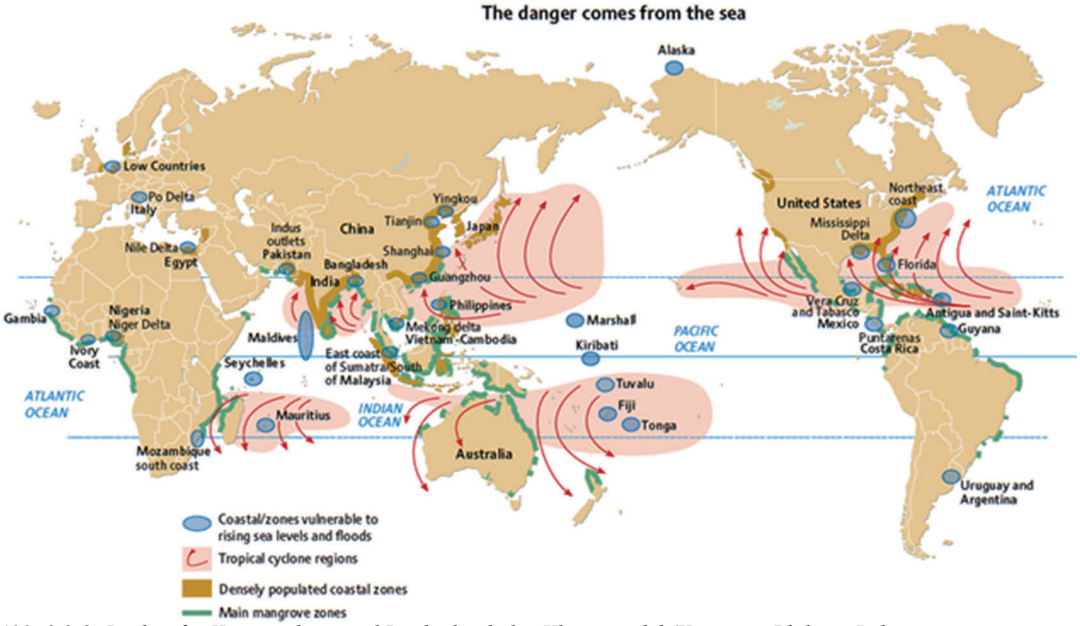


Abb. 3.3-2: *Risiken für Küstengebiete und Inseln durch den Klimawandel (Karte von Philippe Rekacewicz, visionscarto.net, 2009, miit seiner freundlichen Genehmigung).*

Niederlande von 2008, was Planungen in anderen Deltas beeinflusste, insbesondere im Mekong-Delta Vietnams, Ganges-Brahmaputra-Delta Bangladeschs und im Mississippi-River-Delta der USA (Nicholls et al. 2020). Diese Deltapläne unterstreichen, wie wichtig eine Systemsicht, internationale Governance und ein langfristiges Engagement für die Anpassung sind.

Beispielsweise besteht ein wachsendes Interesse an Ansätzen für sanfte Infrastruktur und »Bauen mit der Natur« (van Wesenbeeck et al. 2014) sowie an hybriden Ansätzen, die sanfte und harte Anpassung kombinieren. Dazu zählen die Erhaltung oder Wiederherstellung von Mangroven- und Waldgürteln sowie die kontrollierte Sedimentation in Poldergebieten, um Landabsenkungen zu vermeiden. Statt nur auf kurzfristige Maßnahmen zu setzen, sind langfristige Strategien und der Aufbau institutioneller Kapazitäten erforderlich. Dazu bedarf es einer grenzüberschreitenden Zusammenarbeit zwischen Regionalregierungen und Stadtbehörden. In der Delta Coalition arbeiten Regierungen zusammen, um Wissen, Innovation und nachhaltige Praktiken zu teilen und urbane Deltas resilienter zu machen (Ovink 2015). Die Zusammenhänge werden nachfolgend anhand einiger Beispielregionen dargestellt (siehe auch *Abb. 3.3-3*).

Beispiele urbaner Flussdeltas

Nil

Die Metropolregion Kairo/Gizeh mit ihren insgesamt mehr als 20 Millionen Einwohnern liegt unmittelbar südlich des eigentlichen Nildeltas. Wie ganz Ägypten ist die Hauptstadtregion stark auf eine ausreichende Wasserversorgung aus dem Fluss angewiesen, da es kaum andere Trinkwasserquellen gibt. Die steigende Einwohnerzahl Ägyptens stellt diesbezüglich eine Herausforderung dar, da sich die am Unterlauf des Nils verfügbare Wassermenge nicht mehr deutlich steigern lässt, zumal die Nachfrage nach Wasser aus dem Fluss in den Staaten des Oberlaufs ansteigt. Es gibt eine durch ein Abkommen aus dem Jahre 1959 sichergestellte Wassermenge von rund 65 km³, die Ägypten zur Verfügung steht (Link et al. 2012), viel mehr wird in absehbarer Zukunft nicht möglich sein.

Die intensive Nutzung des Nils in Ägypten hat weitreichende Folgen für die Hydrologie in der Deltaregion. Seit Fertigstellung und Inbetriebnahme des Assuan-Staudamms zeigen Pegelstände am Unterlauf eine sehr gleichmäßige Durchflussmenge im Nil. Die vorher zweimal im Jahr vorkommenden Überflutungen der angrenzenden Uferbereiche werden unterbunden, dadurch ebenso die vorher üblichen Sedimentablagerungen auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen an den Ufern und im Delta. Ein Aufwachsen des Deltas kann nun nicht mehr stattfinden.

Die starke urbane Nutzung des Nilwassers in der Region Kairo wirkt sich auch oftmals negativ auf die Wasserqualität im Delta aus. Für die Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen wird deshalb regelmäßig auf (meist fossiles) Grundwasser zurückgegriffen. Die Folge sind Salzwassereinströme ins Grundwasser oder Landsenkungen, wenn Grundwasseraquifere entleert werden (Mabrouk et al. 2018). Insbesondere die Landsenkung stellt die Einwohner des Nildeltas vor Probleme, da auf diese Weise der an sich moderate absolute Meeresspiegelanstieg im östlichen Mittelmeer in Zusammenhang mit dem Absinken des Deltas zu einem signifikanten relativen Meeresspiegelanstieg wird. Diesem zu begegnen ist nicht einfach, da das Nildelta nicht durchgehend durch harte Küstenschutzmaßnahmen geschützt werden kann (Link et al. 2013). Fundamental ist eine Reduzierung der Grundwassernutzung im Nildelta. Außerdem ist ein Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen nötig, wie z.B. die Nutzung natürlicher Barrieren zum Schutz der Küsten. Zusätzlich wird es notwendig sein, die intensive Küstennutzung, z.B. für den Tourismus, in Teilbereichen des Deltas deutlich zu reduzieren, da die damit verbundenen lokalen Schutzmaßnahmen zu einer Intensivierung der Erosion in angrenzenden Abschnitten des Deltas führen und das Problem lediglich verlagern und nicht lösen.

Pearl River

Das Pearl River Delta (PRD) liegt im mittleren südlichen Teil der Provinz Guangdong in Südchina und besteht aus einer 42.657 km² großen Sedimentebene des Perlflusses (*Pearl River*) mit seinen Verzweigungen. Der langfristige jährliche Mittelwert der Niederschläge in der Region liegt bei etwa 1.800 mm. Etwa 85% der Niederschläge fallen von April bis September. Die natürliche Umwelt des PRD ist sensibel und variabel aufgrund des starken Monsuns, des dichten Flussnetzes und der erheblichen Auswirkungen von Erosion und Ablagerung. Die schnelle wirtschaftliche Entwicklung und das Bevölkerungswachstum haben zu einer starken Fragmentierung der natürlichen Umwelt geführt. Die Kombination dieser Faktoren macht das PRD anfällig für Naturkatastrophen, von denen die Überschwemmungen am schwerwiegendsten sind. Lokale Extremwetterlagen und schlechte Entwässerung im Zusammenhang mit Klimawandel und Urbanisierung machen die Hochwassergefahr für die städtische Agglomeration zu einem großen Problem.

In der Vergangenheit gab es einen zunehmenden Trend bei Temperatur und Meeresspiegel, während bei den Niederschlägen und der Zahl von Taifunen kein

klarer Trend zu erkennen ist. Die Häufigkeit und Intensität extremer Wettereignisse hat zugenommen, ebenso die Verschlammung des Flusssystems, was städtische Hochwasserrisiken steigert (Yang et al. 2015). In Zukunft dürften Niederschlagsraten zunehmen, bei starker Variabilität und zunehmender Häufigkeit extremer Niederschläge mit erheblichen saisonalen Unterschieden. Selbst wenn der Anstieg des Meeresspiegels im Zentimeterbereich Teile des PRDs nicht unter Wasser setzt, erhöht er das Risiko von Sturmfluten und die Kosten für den Wiederaufbau nach Stürmen.

Besonders hoch sind die Schäden in niedrig gelegenen Stadtgebieten mit hohem Wohlstandsniveau und lebenswichtiger Infrastruktur. In großen Städten wie Hongkong, Shenzhen und Guangzhou ist die Bevölkerung besonders verwundbar gegenüber Hochwassergefahren. Obwohl die Exposition und Sensibilität in diesen Städten erheblich ist, können Hochwasserrisiken und Sturmschäden durch die Verbesserung harter und weicher Schutzmaßnahmen erheblich gemindert werden.

Dies stellt die PRD-Region vor große Herausforderungen. Der Klimawandel dürfte das Risikospektrum und die Schwierigkeiten, damit umzugehen, vergrößern. Bis 2100 wird ein Temperaturanstieg von 2,5-3 °C, ein leichter Anstieg der Niederschläge und ein jährlicher Anstieg des Meeresspiegels um 0,33-1 cm erwartet, bei hoher zwischenjährlicher Variabilität des Niederschlags im Verhältnis zur Trendvariabilität, was auf häufigere Extremniederschlagsereignisse hindeutet (Yang et al. 2015).

Unsicherheiten bei Vorhersageergebnissen variieren für verschiedene Modelle, statistische Analysen und Datenquellen. Es braucht weitere Forschung und Bewertungen, um die Zusammenhänge besser zu verstehen (Yang et al. 2018). Allerdings müssen die Entscheidungsträger auf Grundlage derzeit verfügbarer Informationen und Schätzungen planen und handeln. Eine integrierte Klimaschutzstrategie umfasst Frühwarnsysteme und Handlungsempfehlungen, hochwasserbezogene Informationen für die Öffentlichkeit und die Nutzung sozialer Netzwerke. Um zukünftige Möglichkeiten zur Verbesserung zu sondieren, müssen Studien über die Komplexität städtischer Reaktionen auf Hochwasserrisiken und Auswirkungen des Klimawandels verstärkt werden.

Ganges-Brahmaputra

Das Ganges-Brahmaputra-Delta (GBD) in der südasiatischen Region Bengalen ist das weltweit größte Flussdelta, mit einer Fläche von rezent etwa 140.000 km², davon rund 110.000 km² dauerhaft über dem mittleren Tidehochwasser (Falk 2011). Das Einzugsgebiet erstreckt sich über Indien, China, Bhutan, Nepal, Myanmar und Bangladesch, mit einem unwegsamen Labyrinth von Wasserstraßen, Seen, Sümpfen und Inseln, die das Gebiet schwer erschließbar machen, etwa für Straßen, Brücken und Stromnetze. Viele Menschen leben von der Landwirtschaft, von Reisanbau und Viehhaltung. Lehmbauten und einfache Deiche sind den Zyklonen und Sturmfluten meist nicht gewachsen. In Indien werden akut gefährdete Gebiete mit Hilfe der Armee geräumt. Insgesamt leben im GBD über 143 Millionen Menschen, die großen Risiken durch Überschwemmungen, Stürmen und Erdrutschen ausgesetzt sind. Zwischen 1961 und 1991 kamen infolge von 15 Zyklonen etwa 700.000 Menschen ums Leben. In den Jahren 1987 und 1998 forderte der Monsunniederschlag 2.550 bzw. 3.000 Menschenleben.



Abb. 3.3-3: *Impressionen dreier Flussdeltas: links: Kairo am Nil und Nil-Delta; mitte: Hongkong und Guangzhou im Pearl River Delta; rechts: New Orleans und Sümpfe im Mississippi-Delta (Fotos: J. Scheffran & P. M. Link).*

Große Teile des GBD werden in Zukunft wahrscheinlich einen Rückgang der ländlichen Bevölkerung und eine zunehmende Verstädterung mit Schwerpunkt in und um Kolkata und im Großraum Dhaka erleben, wo die Bevölkerungsdichte bereits extrem hoch ist. Zugleich gibt es ein schnelles Wachstum der Wirtschaft und bis 2050 ein vielfach höheres Pro-Kopf-BIP, mit erheblicher Expansion von Industrie und Dienstleistungen, während die Landwirtschaft zunehmend intensiviert wird und die Zahl von Kleinbauern zurückgeht. Damit verbunden ist die Migration von ländlichen in städtische Gebiete

Um exponierte Populationen gegenüber Zyklonen zu schützen, gibt es allein in Bangladesch mehr als 6.000 km Deiche und Böschungen um Küstenpolder und über 2.500 Zyklonschutzbauten (mehrstöckige robuste Gebäude) als Schlüsselelemente im Land- und Katastrophenmanagement. Der wesentliche Ausbau dieser Infrastruktur wird im Rahmen des Bangladesh Delta Plan 2100 fortgesetzt, der ganz Bangladesch abdeckt und eine koordinierte Anpassung und Entwicklung in Bangladesch auslöst, während neue Infrastruktureinrichtungen wie die Padma-Brücke (geplante Eröffnung 2020) die Entwicklung Bangladeschs verändern. Der indische Teil des Deltas würde ebenfalls von seinem eigenen Delta-Plan profitieren, wenn er konsequent umgesetzt wird. Die Neuverhandlung des Ganges-Wasserabkommens ab 2026 dürfte erhebliche Auswirkungen sowohl auf den bangladeschischen als auch auf den indischen Teil des Deltas haben.

Eine zentrale Herausforderung für das GBD in den nächsten Jahrzehnten wird der Klimawandel sein. Dies betrifft auch die Fischerei, die eine Regulierung erfordert, um die Fänge zu erhalten, und ein Wachstum der Aquakultur zur Folge hat. Der Mangrovenwald von Sundarbans kann unter den erwarteten Szenarien eines Anstiegs des Meeresspiegels bis 2100 bestehen bleiben, ist jedoch mit vielen anderen Belastungen wie z.B. Verschmutzung konfrontiert. Der erwartete Rückgang der Sedimentversorgung aus den Flüssen behindert die Anwendung von sedimentbasierten und naturnahen Ansätzen. Unter verbesserten Anpassungsmaßnahmen (z.B. kontrollierter Sedimentation) kann die Landwirtschaft weiterhin gedeihen, und das Delta wird bewohnbar und produktiv bleiben (Rahman et al. 2020.

Mississippi

Das Mississippi River Delta in den USA erstreckt sich über große Teile des Bundesstaates Louisiana und markiert das Mündungsschwemmland, in dem sich u.a. auch die Stadt New Orleans befindet. Dagegen bezieht sich im englischen Sprachgebrauch der Begriff Mississippi Delta (ohne River) auf eine weitaus größere Region, die sich bis nach Kentucky und Missouri erstreckt und sich geologisch auf das gesamte pleistozäne Tal bezieht, das nach der letzten Eiszeit mit Sedimenten aufgefüllt wurde, die der Fluss von Norden herantransportiert hat.

Der Mississippi hat die Geschichte der Vereinigten Staaten von Amerika maßgeblich geprägt, nicht nur was die Besiedlung angeht, sondern auch in Hinblick auf die Sezession einzelner Staaten im 19. Jahrhundert (Collins 2015). Im Laufe der letzten zwei Jahrhunderte bildete sich unter Einfluss vieler unterschiedlicher Volksgruppen die sogenannte Mississippi-Kultur. Das kulturelle und wirtschaftliche Leben der ganzen Region ist stark abhängig vom Fluss, der mit einem Durchfluss im Unterlauf von über 550 km³ pro Jahr zu den 10 wasserreichsten Flüssen der Welt gehört.

Während Schwankungen in der Durchflussmenge derzeit eine eher untergeordnete Rolle spielen, ist das Mississippi River Delta besonders exponiert gegenüber dem Meeresspiegelanstieg im Golf von Mexiko und möglichen Veränderungen in Häufigkeit und Stärke von Sturmereignissen bzw. Hurrikanen. Markantestes Beispiel ist der Hurrikan Katrina, der im Jahr 2005 die Südküste der Vereinigten Staaten heimsuchte und zu den verheerendsten Naturkatastrophen in den USA zählt. Insbesondere die Stadt New Orleans wurde schwer beschädigt, da die hauptsächlich entlang des Mississippi River errichteten Deiche zwar hielten, die Küstenschutzmaßnahmen an einigen kleineren Kanälen der Belastung aber nicht gewachsen waren. Durch diese Deichbrüche ergoss sich Wasser des Lake Pontchartrain in das tieferliegende Stadtgebiet und führte dazu, dass rund 80% der Stadt über einen längeren Zeitraum metertief unter Wasser stand. Ein großer Teil der Bevölkerung wurde evakuiert und ist zum Teil bis heute nicht zurückgekehrt.

Der Wiederaufbau erfolgte schrittweise und einige Bereiche des Stadtgebietes wurden gar nicht oder nur teilweise wiedererrichtet. Sogar die gänzliche Aufgabe der Stadt wurde von einigen Politikern propagiert. New Orleans‘ Lage unterhalb des Meeresspiegels macht es notwendig, die Stadt ständig gegen den Einfluss des Meeres zu schützen (Kates et al. 2006). Im letzten Jahrhundert sind rund 5.000 km² Landfläche im Mississippi River Delta verlorengegangen. Selbst bei einem moderaten Anstieg des Meeresspiegels im Golf von Mexiko ist zu erwarten, dass der Küstenschutz in der Deltaregion zu steigenden Kosten führt, die selbst die wirtschaftliche Kraft der Südstaaten der USA vor nicht zu vernachlässigende Herausforderungen stellt. Dabei werden auch natürliche Schutzkonzepte im Mississippi-Delta (USA) entwickelt (Costanza et al. 2006; Day et al. 2007), um den massiven Verlusten von Feuchtgebieten entgegenzuwirken.

Rhein

Das Rhein-Maas-Delta ist eines der bedeutendsten Flussdeltas Europas und erstreckt sich über die Staaten Deutschland, Niederlande und Belgien. Es hat sich seit dem Ende der letzten Eiszeit vor etwa 8000-9000 Jahren durch massiven Sedimenteintrag aus dem Flusssystem gebildet (Beets & van der Spek 2000). Der weitaus größte Teil des Rheinwassers wird durch die Waal im Süden der Niederlande in die Nordsee entwässert, während lediglich ein geringer Teil ins Ijsselmeer fließt. Landschaftlich besteht die Mündungsregion des Rheines aus flachen, sehr tiefliegenden Bereichen, die zu einem nicht unerheblichen Teil unterhalb des Meeresspiegels liegen. Küstenschutzmaßnahmen in Form von Deichen haben in den vergangenen Jahrhunderten diese Region effektiv gegen meerseitige Überflutungen verteidigt, so dass sich große Städte und industrielle Regionen wie Rotterdam oder Dordrecht entlang der Mündungsarme gebildet haben.

Die hohe Bevölkerungsdichte und die ausgesprochen umfangreiche Infrastruktur führen in Zeiten des Klimawandels zu besonderen Herausforderungen an den Küstenschutz (van Koningsveld et al. 2008). Bestehende Deiche in der Mündungsregion können nicht beliebig erhöht werden, so dass das Überflutungsrisiko der tiefliegenden Landstriche bei Extremwetterereignissen langfristig ansteigt. Es ist offen, wie lange selbst ein weltweit beim Küstenschutz führendes Land wie die Niederlande den enormen Aufwand betreiben kann, sein Staatsgebiet gegen das Meer zu schützen. Die nach der Flutkatastrophe 1953 geplanten und bis 1997 errichteten Deltawerke sind ein System von Sperrwerken und Deichen, die die Niederlande effektiv gegen Überflutungen schützen sollen. Sie haben einerseits das Überflutungsrisiko für weite Teile der südlichen Niederlande verringert, jedoch zu einer massiven Verkürzung der Küstenlinie der Niederlande beigetragen. Darüber hinaus sind Steuerungen der Durchflussmengen im Mündungssystem möglich.

Unter den Mündungsarmen ist der Nieuwe Waterweg der für die Schifffahrt bedeutendste, da an ihm mit Rotterdam einer der größten Häfen Europas liegt. Um eine ständige Befahrbarkeit zu garantieren, wird der Wasserdurchfluss durch die Deltawerke derart gesteuert, dass immer mindestens die Hälfte des vom Rheinsystem in die Nordsee fließenden Wassers durch den Nieuwe Waterweg fließt. Ähnlich der Situation in der Elbe für den Hamburger Hafen wurden in der Vergangenheit mehrere Anpassungen der Fahrrinnentiefe im Nieuwe Waterweg notwendig. Insgesamt ist das Rhein-Maas-Delta eines der am stärksten vom Menschen überprägten Deltas weltweit. Derzeit ist die Anpassungsfähigkeit an sich ändernde hydrologische Gegebenheiten noch hoch, aber dieses umfangreiche Küstenschutzsystem erfordert ein hohes Maß an Unterhalt, da ein Versagen aufgrund der topographischen Gegebenheiten in den Niederlanden hohe Verluste an Land, Infrastruktur und wohl auch Leben zur Folge hätte.

Literatur

AERTS J. C., W. W. BOTZEN, K. EMANUEL et al. (2014): Evaluating Flood Resilience Strategies for Coastal Megacities. Science, 344: 473-475.

BEETS D. J. & A. J. VAN DER SPEK (2000): The Holocene evolution of the barrier and the back-barrier basins of Belgium and the Netherlands as a function of late Weichselian morphology, relative sea-level rise and sediment supply. Netherlands Journal of Geosciences, 79(1): 3-16.

CAMPANELLA R. (2010): Delta Urbanism. Chicago, Illinois: The American Planning Association.

COLLINS J. (2015). Defining the Delta: Multidisciplinary Perspectives on the Lower Mississippi River Delta: University of Arkansas Press.

COSTANZA R., W. J. MITSCH & J. W. JR. DAY (2006): A new vision for New Orleans and the Mississippi Delta: Applying ecological economics and ecological engineering. Frontiers in Ecology and the Environment, 4(9): 465-472.

ERICSON J. P., C. J. VOROSMARTY, S. L. DINGMAN et al. (2006): Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications. Global Planetary Change, 50: 63-82.

FALK G. C. (2011): Deltawachstum trotz Meeresspiegelanstieg – Entwarnung für Bangladesh?, Klett-Magazin Geographie, 1. Hj., 9-13.

IPCC (2014): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Fifth Assessment Report, vol 2, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

IPCC (2019): Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Intergovernmental Panel on Climate Chance, Geneva.

KATES R. W., C. E. COLTEN, S. LASKA & S. P. LEATHERMAN (2006): Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: a research perspective. Proceedings of the National Academy of Sciences, 103(40): 14653-14660.

LINK P. M., J. KOMINEK & J. SCHEFFRAN (2013): Impacts of accelerated sea level rise on the coastal zones of Egypt. Mainzer Geographische Studien, 55: 79-94.

LINK P. M., F. PIONTEK, J. SCHEFFRAN & J. SCHILLING (2012): On foes and flows: vulnerabilities, adaptive capacities and transboundary relations in the Nile river basin in times of climate change. L'Europe en formation, (3): 99-138.

MABROUK M., A. JONOSKI, G. H. P. OUDE ESSINK & S. UHLENBROOK (2018): Impacts of Sea Level Rise and Groundwater Extraction Scenarios on Fresh Groundwater Resources in the Nile Delta Governorates, Egypt. Water, 10(11): 1690.

NICHOLLS R. J., W. N. ADGER, C. W. HUTTON & S. E. HANSON (eds.) (2020): Deltas in the Anthropocene. Palgrave Macmillan.

OVINK H. (2015): Urban Deltas: Water-Related Climate Impacts. Report of Working Group 6. Planetary Security Conference, The Hague, 2-3 Nov. 2015. The Hague, Netherlands.

RAHMAN M. M., T. GHOSH, S. MASHFIQUS, A. GHOSH et al. (2020): Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta, Bangladesh and India: A Transnational Mega-Delta. In: Nicholls, R. J. et al. (eds.) (2020). Deltas in the Anthropocene. Palgrave Macmillan, 23-51.

SEIJGER C., W. DOUVEN, G. VAN HALSEMA et al. (2017): An analytical framework for strategic delta planning: Negotiating consent for long-term sustainable delta development. Journal of Environmental Planning and Management, 60(8): 1485-1509.

VAN KONINGSVELD M., J. P. MULDER, M. J. STIVE et al. (2008): Living with sea-level rise and climate change: a case study of the Netherlands. Journal of Coastal Research, 24(2): 367-379.

VAN WESENBEECK B. K., J. P. MULDER, M. MARCHAND et al. (2014): Damming deltas: a practice of the past? Towards nature-based flood defenses. Estuarine, Coastal and Shelf Science 140: 1-6

YANG L. E., J. SCHEFFRAN, H. QIN & Q. YOU (2015): Climate-related Flood Risks and Urban Responses in the Pearl River Delta, China. Regional Environmental Change, 15(2): 379-391.

YANG L. E., F. K. S. CHAN & J. SCHEFFRAN (2018): Climate change, water management and stakeholder analysis in the Dongjiang River basin in South China. International Journal of Water Resources Development, 34(2): 166-191.

Kontakt:

Prof. Dr. Jürgen Scheffran
juergen.scheffran@uni-hamburg.de
Dr. P. Michael Link
michael.link@uni-hamburg.de
Institut für Geographie - CEN Universität Hamburg

Scheffran J. & P. M. Link (2019): Städtische Agglomerationen in Flussdeltagebieten. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 91-98. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.13.

3.4 Risikolebensraum Kathmandu (Nepal): Klima- und Umweltveränderungen im Urbanisierungsprozess einer Himalaya-Metropolregion

Udo Schickhoff

In den letzten Jahrzehnten hat das einst beschauliche, ländlich geprägte Kathmandu-Tal einen sich rasch vollziehenden, weitgehend unkontrollierten Urbanisierungsprozess erlebt, der in ursächlichem Zusammenhang mit dem hohen Bevölkerungswachstum und stark zunehmender Zuwanderung aus anderen Regionen Nepals steht. Ausgeprägte infrastrukturelle Defizite, vor allem völlig unzureichende bzw. nicht vorhandene Müllentsorgung und Abwasseraufbereitung, haben zu gravierenden und gesundheitsgefährdenden Umweltproblemen geführt, die sich im Klimawandel verschärfen. Die Himalaya-Metropole Kathmandu muss deshalb als Risikolebensraum eingestuft werden.

Risk habitat Kathmandu (Nepal): Climatic and environmental changes in the wake of the urbanization process of a Himalayan metropolitan region: *In recent decades, the once secluded, predominantly rural Kathmandu valley has experienced a rapidly ongoing, largely uncontrolled urbanization process, to be attributed to high population growth and considerably increasing immigration from other regions of Nepal. Apparent infrastructural deficits, in particular completely insufficient waste disposal and wastewater treatment, have resulted in severe environmental degradation which is hazardous to human health and which is aggravated by climate change. The Himalayan metropolis Kathmandu has thus to be classified as risk habitat.*

Das Kathmandu-Tal ist das touristische Zentrum Nepals, die Altstadt Kathmandus gehört wie die Nachbarstädte Patan (Lalitpur) und Bhaktapur zum UNESCO-Weltkulturerbe. Das Tal, von bis zu 2.700-2.800 m hohen Gebirgszügen umrahmt, ist geprägt von der Schönheit der Natur, prachtvollen Tempelbauten und weiteren beeindruckenden kulturhistorischen Sehenswürdigkeiten. Es stellt mit der Hauptstadt Kathmandu das wirtschaftliche, politische, institutionelle und technologische Zentrum und zugleich den größten Ballungsraum des Landes dar. Der Urbanisierungsprozess der letzten Jahrzehnte hat den Siedlungsraum Kathmandu-Tal massiv verändert. Inzwischen leben über 3,5 Mio. Menschen im Kathmandu-Tal, eine der am schnellsten wachsenden Agglomerationen Südasiens. Die weitgehend unkontrollierte Stadtentwicklung hat zu extremer Luft- und Wasserverschmutzung geführt, die, noch verstärkt durch den Klimawandel, eine gravierende Gesundheitsgefährdung für die Einwohner bedeuten. Die Anzahl der Fahrzeuge im Kathmandu-Tal wächst noch schneller als die Bevölkerung, was die lufthygienische Situation drastisch verschlechtert hat. Die Wasserqualität in den Flüssen, die früher das Tal mit sauberem Wasser versorgt haben, ist katastrophal; sie sind durch Müllentsorgung und Einleitung von Abwässern zu Kloaken verkommen. In diesem Kapitel wird eine Übersicht zur rasanten Stadtentwicklung und dadurch ausgelöster Umweltprobleme gegeben.

Stadtentwicklung und Siedlungsverdichtung im Kathmandu-Tal

Das Kathmandu-Tal im engeren Sinne (der mit quartären Sedimenten bedeckte Talboden) hat eine N-S-Ausdehnung von etwa 20 km und erstreckt sich über etwa 25 km in W-E-Richtung. Aus der Umrahmung der durchschnittlich 2000 m hohen Gebirgszüge der Mahabharat-Kette resultiert eine kesselartige Form dieses intramontanen tektonischen Beckens, das mit insgesamt 665 km² nicht größer als die Fläche Hamburgs ist. Der flache Beckenboden liegt auf etwa 1.300 m NN und besteht überwiegend aus bis zu 650 m mächtigen fluvio-lakustrinen Sedimenten (vornehmlich wasserstauende, graue und dunkle Tone und Mergel), die großenteils auf die Verlandung eines pleistozänen Sees zurückgehen (Sakai et al. 2006). Entwässert wird das Becken durch den Bagmati, der in der nördlichen Gebirgsumrahmung entspringt, im Beckeninneren zahlreiche Quellflüsse aufnimmt und in einem antezedenten Durchbruchstal im Süden das Kathmandu-Tal verlässt (Haffner 1979). Die Beckenlage bedingt einen erschwerten Austausch von Luftmassen, was zu einer enorm angestiegenen Konzentration von Luftschadstoffen geführt hat (s.u.).

Das schwer zugängliche, aber leicht zu verteidigende Kathmandu-Becken gehört als malariafreier Gunstraum für Siedlungen und Landwirtschaft zu den ältesten besiedelten Räumen des zentralen Himalaya. Die fruchtbaren, häufig ganzjährig bewässerbaren Böden haben das Tal bereits in frühbuddhistischer Zeit zu einem intensiv landwirtschaftlich genutzten Raum werden lassen. Weitere frühe Impulse zur Stadtentwicklung gingen von Verkehr und Handel aus. Aufgrund der Lage an einer der wichtigsten Handels- und Pilgerrouten zwischen Nordindien und Tibet – die Pässe über die Himalaya-Hauptkette sind entlang dieser Route ganzjährig schneefrei – war das Tal seit seiner frühen Geschichte ein Handelszentrum mit wohlhabenden und einflussreichen Herrschern und deshalb über viele Jahrhunderte hinweg gleichbedeutend mit dem Staat bzw. der Inbegriff des Königreichs Nepal (Donner

1972). Hier konnten sich mit den Königsstädten Kathmandu, Patan und Bhaktapur frühe Zentren einer bedeutenden Stadtkultur herausbilden (Blütezeit während der Malla-Dynastie 1476-1768), deren Straßenbild von typischerweise dreigeschossigen Häusern aus ziegelgefülltem, mit Schnitzereien verziertem Fachwerk und den Tempelpagoden der überwiegend hinduistischen Newar geprägt wird. Die Newar leben seit über 2000 Jahren im Kathmandu-Tal und bilden die größte ethnische Gruppe, deren Identität auf eine tibeto-burmanische Sprache, das Newari, zurückgeht. Die Newar-Städte zeichnen sich durch eine Bebauungsdichte und eine Struktur aus Gassen, Innenhöfen und Platzfolgen aus, die an kompakte mittelalterliche Städte Mitteleuropas erinnern (Gutschow & Kreutzmann 2012). Mitte des 18. Jahrhunderts wurden die drei Königsstädte durch die Gorkha-Dynastie der Shah-Könige erobert, die viele mittelalterliche Baudenkmäler und kulturelles Erbe zerstörten. Bis 1816 stellten die Hindu-Könige die politische Einheit Nepals in seinen heutigen Grenzen her und regierten das Land bis zur Abschaffung der Monarchie im Jahr 2008.

Nach der Öffnung Nepals begann der Urbanisierungsprozess Mitte der 1950er Jahre, zunächst mit noch sehr langsamem Wachstum Kathmandus außerhalb des historischen Stadtkerns, angeregt durch die funktionale Erweiterung, die mit dem Bau von Straßen und des internationalen Flughafens sowie weiterer Infrastruktur verbunden war. Ende der 1960er Jahre bestand die Bevölkerung in Kathmandu noch zu 60%, in Patan zu 80% und in Bhaktapur zu 90% aus Landwirten (Donner 1972), die täglich von ihren Wohnhäusern zu am Stadtrand angrenzenden Feldfluren pendelten. Mit verstärkter Zuwanderung aufgrund zunehmender Beschäftigungsmöglichkeiten in der sich etablierenden Teppich- und Textilindustrie, im aufblühenden Handel und Tourismus und im Staatsapparat setzte sich die Urbanisierung in der Dekade 1970-1980 fort, zusätzlich begünstigt durch den Bau der Kathmandu und Patan umschließenden Ring Road und weiterer Verbindungs- und Ausfallstraßen (ICIMOD 2007). Bis auf die drei alten Königsstädte und kleinere Siedlungskerne wie Kirtipur oder Thimi war das Kathmandu-Tal jedoch bis in die 1980er Jahre ein stark ländlich geprägter Raum (*Abb. 3.4-1*). Beim ersten Kathmandu-Besuch 1984 konnte der Verfasser noch das gesamte Tal mit dem Fahrrad bei sehr geringem Verkehrsaufkommen und ohne nennenswerte Luftverschmutzung erkunden. Bei einem weiteren Besuch im Jahr 2000 war die frühere Peripherie der Städte kaum noch wiederzuerkennen, Kathmandu und Patan bereits dicht zusammengewachsen, und der Raum entlang der Straßen im Tal suburbanisiert. Seit den 1980er Jahren hat das Kathmandu-Tal einen ungezügelten, sich erheblich intensivierenden Urbanisierungsprozess erlebt, mit der Hauptphase einer substanziellen Transformation der Tallandschaft und des Siedlungsbildes mit Neubebauung und Verdichtung zwischen 1989 und 2009 (vgl. *Abb. 3.4-1*). Allein im Zeitraum zwischen 1989 und 2016 hat die bebaute Fläche um mehr als 500% zugenommen, insbesondere entlang der die Städte und Dörfer verbindenden Hauptstraßen, und nimmt gegenwärtig zwischen 25 und 30% der gesamten Talfläche ein (*Abb. 3.4-2*). Diese Zunahme erfolgte im Wesentlichen auf Kosten fruchtbaren Ackerlandes, das im gleichen Zeitraum von über 80% auf ca. 55% der Talfläche zurückging, während die Waldfläche in der Zeit der besonders intensiven Urbanisierung mehr oder weniger unverändert blieb und sich in den letzten Jahren leicht auf ca.15% erhöhte (Ishtiaque et al. 2017). Nach dem Erdbeben 2015 hat durch die Wiederbelebung der Bauwirtschaft die Neubebauung von Flächen außerhalb der Kernstädte wieder stärker zugenommen, während das Jahrzehnt zuvor durch Verdichtung der bestehenden Siedlungskerne geprägt war.

Die Ursachen für diesen anhaltenden Trend der Transformation eines beschaulichen ländlichen Raumes mit Siedlungskernen in ein hochverdichtetes Ballungs-



Abb. 3.4-1: *Kathmandu im Urbanisierungsprozess, 1984-2016 (Photos © Udo Schickhoff, 17.03.1984 u. 13.09.2016)*

zentrum sind komplex. Kathmandu kontrolliert als Primatstadt Nepals Wirtschaft, Finanzen, Industrieproduktion und Staatsführung des Landes und übt mit entsprechenden Pull-Faktoren eine ungeheure Anziehungskraft aus, bei gleichzeitig wirksamen wirtschaftlichen und sozialen Push-Faktoren großer Tragweite in den übrigen Regionen Nepals. Es gibt wenige andere Metropolen vergleichbarer Größe im Himalaya oder in anderen Hochgebirgsregionen Asiens. Neben der Funktion als politisch-administratives, wirtschaftlich-industrielles und touristisches Zentrum und als Drehscheibe für weitere sozio-ökonomische Sektoren wie Finanzen, Bildungswesen und Gesundheitsfürsorge gehören der sich seit Mitte der 1990er Jahre verstärkende Immobilienboom sowie das sich seit den 1980er Jahren erheblich beschleunigende Bevölkerungswachstum, das insbesondere auf die Land-Stadt-Migration zurückgeht, zu den wesentlichen Ursachen der Urbanisierung. Die Bevölkerung im Stadtgebiet von Kathmandu hat von 104.000 Einwohnern im Jahr 1950 über 235.000 im Jahr 1981 auf derzeit etwa 1,4 Mio. zugenommen (*Abb. 3.4-3*). Im gesamten Becken waren es 196.000 (1952), 768.000 (1981) und über 2,5 Mio. Einwohner im Jahr 2011 (Rimal et al. 2017). Bei Wachstumsraten von über 4% über die letzten Jahre kann gegenwärtig von einer Bevölkerung von über 3,5 Mio. ausgegangen werden (mehr als 5000 Einwohner pro km²). Der Nettozustrom von Migranten aus anderen Regionen Nepals, der sich insbesondere während des Maoistenaufstandes mit bürgerkriegsähnlichen Zuständen (1996-2006) verstärkte, macht gegenwärtig 35-40% der Bevölkerung des Kathmandu-Tals aus. Der Urbanisierungsprozess verlief großenteils unkontrolliert und planlos (»*haphazard and uncontrolled urban growth and expansion*«, »*urban explosion rather than managed urban growth*«) (HMG-MPE 1999), so dass die Errichtung der benötigten Transport-, Ver- und Entsorgungsinfrastruktur und die Schaffung neuen Wohnraums nicht mit der rapiden Stadtentwicklung Schritt halten konnten. Grenzen des Wachstums sah die in Kathmandu erscheinende Zeitschrift »Himal« schon Anfang der 1990er Jahre erreicht. Zwar hat es seit den 1960er Jahren immer wieder stadtplanerische Bemühungen seitens verschiedener Ministerien, weiterer Institutionen und ausländischer Geberorganisationen gegeben, die in zahlreichen Entwicklungsplänen ihren Niederschlag fanden, doch die Umsetzung hochgesteckter Ziele und Programme gelang aufgrund instabiler politisch-administrativer Verhältnisse, institutioneller Schwächen und mangelnder Koordination der vielen beteiligten Akteure in städtischen und suburbanisierten Räumen des Beckens nur in Ansätzen (vgl. Thapa et al. 2008; Gutschow & Kreutzmann 2012, 2013).

Folgen des Urbanisierungsprozesses für die Umwelt: Luftverschmutzung

Die zunehmende Verstädterung, Industrialisierung und Motorisierung im Kathmandu-Becken hat zu einer massiven Luftverschmutzung geführt, die Emissionen verschiedener Luftschadstoffe stiegen im Zuge des Urbanisierungsprozesses um das Vielfache an, so dass von ihnen eine erhebliche Gesundheitsgefährdung ausgeht. Bereits in den 1990er Jahren belegte eine Messreihe am im zentralen Bereich des Beckens gelegenen Kathmandu Airport signifikant verschlechterte Sichtverhältnisse über den Zeitraum der vorausgegangenen 25 Jahre (Shah & Nagpal 1997). Die Anreicherung der Luftschadstoffe wird durch die topographische Situation einer kesselförmigen Beckenlage in hohem Maße begünstigt, die zur Abschwächung horizontaler Winde

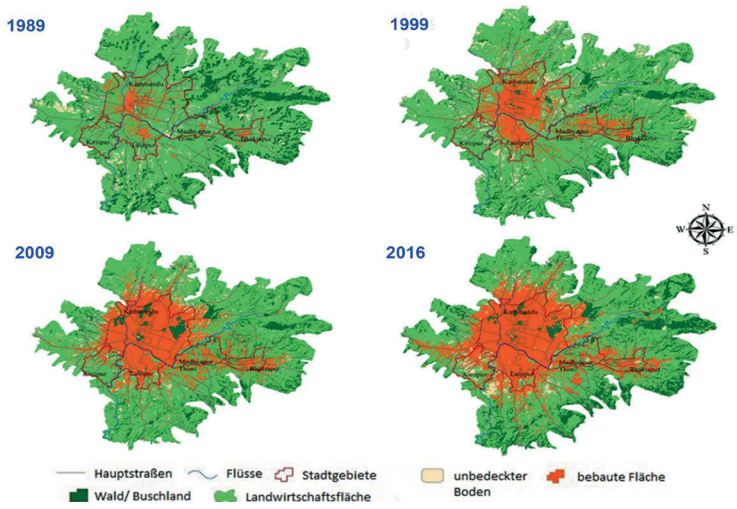


Abb. 3.4-2: *Zunahme der bebauten Fläche im Kathmandu-Tal 1989-2016 (nach Ishtiaque et al. 2017).*

und zu nächtlichen und winterlichen Temperaturinversionen führt, wodurch Ventilation und Luftaustausch entscheidend vermindert werden. Die Akkumulationen häufig gemessener Schadstoffe wie Feinstaub, Stickoxide, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid weisen in der Regel charakteristische tägliche und jahreszeitliche Muster auf. Ein erstes Tagesmaximum erreicht die Luftverschmutzung in den Morgenstunden nach Sonnenaufgang, wenn sich die in die bodennahe Kaltluft über Nacht emittierten Schadstoffe mit denen des Vortags in der oberhalb angrenzenden Luftschicht mischen (Panday & Prinn 2009). Tagsüber auflebende Westwinde senken die Schadstoffkonzentration, bevor die Ventilation über den Nachmittag nachlässt und am frühen Abend ein zweites Tagesmaximum erreicht wird. Die mit katabatischen Hangabwinden transportierten relativ sauberen Luftpakete der Gebirgsumrahmung schieben sich in den späteren Abendstunden unter die wärmere, leichtere, verschmutzte Luftschicht, wodurch bodennah die Schadstoffkonzentrationen zunächst wieder zurückgehen, bevor sie in der zweiten Nachthälfte erneut ansteigen. Das jahreszeitliche Muster wird durch den Sommermonsun geprägt, der mit intensiver Konvektion und starken Regenfällen zwischen Juni und September (80% der Jahresniederschläge) eine stark reinigende Wirkung auf die Luftmassen im Kathmandu-Tal ausübt. Im Winterhalbjahr und in der trockenen Vormonsunzeit werden Schadstoffpartikel dagegen kaum ausgewaschen und die Luftverschmutzung ist um das Vielfache höher. Höchstwerte werden aufgrund der häufigen Inversionslagen im Dezember/Januar erreicht (ICIMOD 2007).

Ein aussagekräftiger Indikator der Luftverschmutzung ist die Feinstaubbelastung, die im Kathmandu-Tal insbesondere auf Emissionen aus dem Straßenverkehr (Abgase, Bremsen- und Reifenabrieb, Staubaufwirbelung von Straßenoberflächen) zurückgeht. Vor 1950 gab es im Kathmandu-Tal nur sehr wenige Automobile, die für das Königshaus in Einzelteilen von Trägern über die südlichen Gebirgsketten herangeschafft und vor Ort zusammengesetzt wurden. Inzwischen ist die Anzahl der registrierten motorisierten Fahrzeuge in der das Kathmandu-Tal einschließenden Bagmati-Verwaltungszone von etwa 39.000 im Jahr 1989 auf knapp 1,2 Mio. im Jahr 2018 angestiegen (*Abb. 3.4-4*). Die jährlichen Wachstumsraten liegen um die 10%. Insbesondere die Anzahl der Motorräder hat stark zugenommen, sie machen derzeit 78% der Gesamtanzahl der Fahrzeuge aus, gefolgt von der Gruppe Auto/Jeep/Van mit etwa 14%. Die Gesamtzahl der durch besonders hohen Schadstoffausstoß gekennzeichneten Busse, Minibusse und LKW beträgt inzwischen über 43.000 (knapp 4%). Für diese hohe Verkehrsdichte ist das Straßennetz nicht ausgelegt, weshalb die Straßen von Jahr zu Jahr stärker verstopfen und es inzwischen zu quasipermanenten Verkehrsstaus auf den Hauptstraßen kommt, was den Schadstoffausstoß zusätzlich erhöht. Daneben

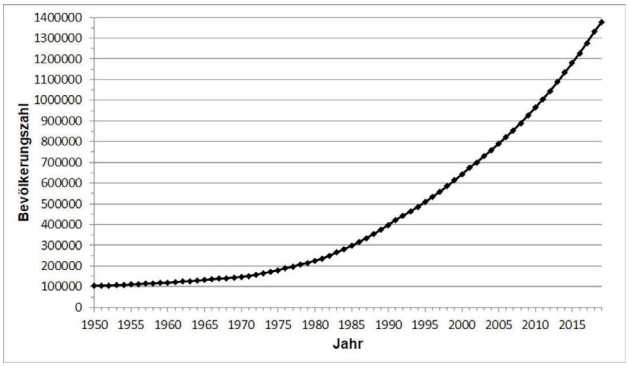


Abb. 3.4-3: *Bevölkerungswachstum im Stadtgebiet von Kathmandu (nach Daten von populationstat.com).*

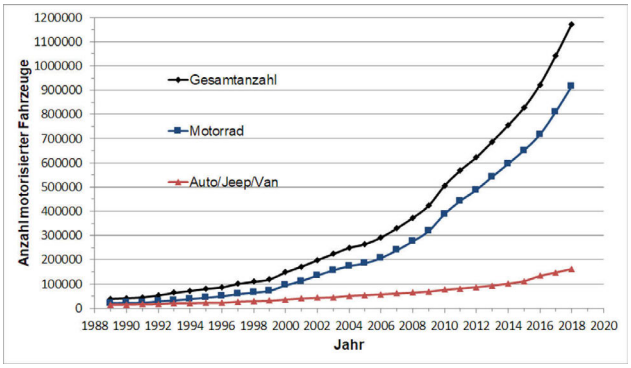


Abb. 3.4-4: *Zunahme motorisierter Fahrzeuge im Kathmandu-Tal (nach Daten in ICIMOD 2007 und dotm.gov.np).*

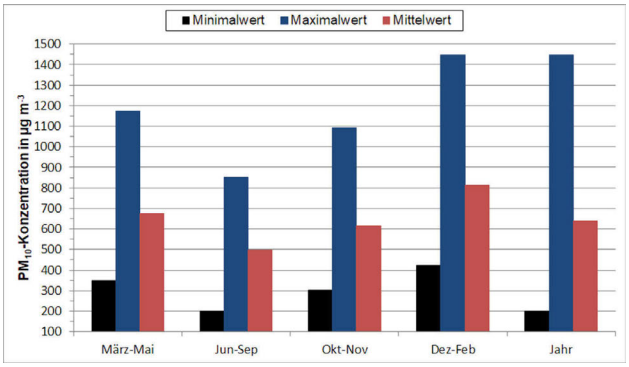


Abb. 3.4-5: *Saisonale PM_{10}-Konzentrationen im Jahr 2008, gemittelt über 10 Straßenkreuzungen in Kathmandu (nach Daten in Majumder et al. 2012).*

tragen weitere Verbrennungsprozesse (Biomasse, Müll, fossile Brennstoffe) in Haushalt und Industrie, hier insbesondere der Betrieb zahlreicher Ziegeleien, zur Luftverschmutzung bei. Die Anzahl der Ziegelöfen ist von 6 im Jahr 1965 auf derzeit über 100 angestiegen. Auch wenn die Rußentwicklung der neueren Ringöfen abgenommen hat, geht von ihnen der wesentliche Anteil der industriellen Feinstaubemissionen aus. Die Feinstaubbelastung erreicht indes vor allem entlang der Hauptverkehrsachsen Spitzenwerte, besonders gravierend ist der hohe Anteil der $PM_{2,5}$-Fraktion (particulate matter mit maximalem Durchmesser < 2,5 Mikrometer (µg)) am gesamten Feinstaub von mehr als 60% (ICIMOD 2007).

Eine Untersuchung an 10 Straßenkreuzungen mit extrem hoher Verkehrsdichte in Kathmandu ergab eine PM_{10}-Konzentration von 640 µg/m³ im Jahresdurchschnitt (*Abb. 3.4-5*) (Majumder et al. 2012). Selbst in der Monsunzeit betrug der Mittelwert noch 498 µg/m³, was den WHO-Richtwert von 20 µg/m³ (Jahresmittel) um das 25-fache und den zulässigen Jahresmittelwert in der EU von 40 µg/m³ um mehr als das 12-fache überschreitet. Auch in dem weniger strengen nepalesischen Grenzwertsystem werden solche Werte als »hazardous« eingestuft. Daraus ergibt sich vor allem für an Verkehrsknotenpunkten wohnende oder arbeitende Menschen eine substanzielle Gesundheitsgefährdung. Dies gilt insbesondere für Verkehrspolizisten, die stundenweise $PM_{2,5}$-Spitzenwerten von über 500 µg/m³ ausgesetzt sind (Gurung & Bell 2012), mehr als das 20-fache des WHO-Richtwertes von 25 µg/m³ für $PM_{2,5}$ im Tagesmittel. Neuere Untersuchungen belegen sogar $PM_{2,5}$-Spitzenwerte von 800 bis über 1.000 µg/m³ an wichtigen Straßenkreuzungen (Shakya et al. 2017). Von Feinstaub ausgelöste gesundheitliche Beeinträchtigungen reichen von Schleimhautreizungen im Nasen- und Rachenraum und Entzündungsreaktionen bis hin zu chronischen Lungenerkrankungen (Bronchitis, Asthma, COPD, Lungenkrebs) und einer Schädigung des Herz-Kreislauf-Systems. Atemwegserkrankungen führen immer häufiger zu Krankenhausaufenthalten im Kathmandu-Tal. Eine Auswertung von 11.300 diesbezüglichen Patientendaten in 2015 ergab, dass bei 40% COPD, bei 29% Lungenentzündung und bei 15% andere akute Atemwegsinfektionen diagnostiziert wurden (Karki et al. 2016).

Mit zunehmender Entfernung von den Hauptverkehrsstraßen geht die Feinstaubbelastung im Kathmandu-Tal zwar etwas zurück, liegt aber immer noch höher als in Megastädten wie Delhi, Kairo, Dhaka, Kolkata oder Mumbai, und immer noch weit über internationalen Grenzwerten. Der Gradient abnehmender PM_{10}-Konzentrationen verläuft von den Stadtkernen über die suburbanisierten Räume zu den randlichen Talräumen. Selbst im noch dörflich geprägten Machhegau (Matsyagaon) am Talrand wurde in einer vierjährigen Messreihe (2003-2006) der WHO-Richtwert für PM_{10} um das Doppelte überschritten. Der Urbanisierungsprozess hat vor allem wegen der zunehmenden verkehrsbedingten Emissionen auch die Konzentrationen weiterer Luftschadstoffe (Stickoxide, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid) in den letzten Dekaden deutlich erhöht. Im Jahr 2014 lagen die Stickoxid-Konzentrationen in Kathmandu und Patan im Jahresmittel bei etwa 50 µg/m³, im Winter und in der Vormonsunzeit können Spitzenwerte von bis zu 240 µg/m³ auftreten (Gurung et al. 2017); der EU-Jahresgrenzwert beträgt 40 µg/m³. Etwa 10.000 vorzeitige Todesfälle pro Jahr in Nepal stehen in Zusammenhang mit der Luftverschmutzung. Eine Reduzierung der Schadstoffemissionen und der daraus resultierenden Gesundheitsgefährdung bleibt eine der großen Herausforderungen von Stadtplanung und Umweltschutz im Kathmandu-Tal.

Folgen des Urbanisierungsprozesses für die Umwelt: Wasserverschmutzung

Dass die Schaffung einer ausreichenden Ver- und Entsorgungsinfrastruktur mit dem raschen Bevölkerungswachstum und der rapiden Urbanisierung im Kathmandu-Tal nicht Schritt halten konnte, wird an der Problematik der Wasserverschmutzung besonders deutlich (*Abb. 3.4-6*). Der Bagmati und seine Zuflüsse sind in den urbanen Räumen des Tales zu dunkelbraun gefärbten Abwasserkanälen mit erheblicher Geruchsbelästigung transformiert worden, gekennzeichnet durch sehr geringe Konzentrationen an gelöstem Sauerstoff, bakterielle Kontamination, toxische Substanzen und große Mengen an Nitrat, Phosphat und Ammoniak. Außerhalb der Monsunzeit sind Quantität und Qualität des fließenden Wassers besonders gering. In der Winter- und Vormonsunzeit ist im Unterlauf des Bagmati aufgrund der extremen Verschmutzung kein gelöster Sauerstoff mehr vorhanden. Eine Untersuchung im Januar 2014 entlang des Bagmati-Flusslaufs ergab eine Abnahme der Konzentration an gelöstem Sauerstoff von 8,8 mg/l am Oberlauf bei Sundarijal im nördlichen Kathmandu-Tal über 5,4 mg/l vor den Leichenverbrennungsstätten am Pashupatinath-Tempel am Stadtrand von Kathmandu, 3,4 mg/l am Zusammenfluss mit dem Manhara zwischen Kathmandu und Patan, 0,4 mg/l am Zusammenfluss mit dem Bishnumati bis hin zu 0 mg/l in Chobhar, südwestlich der Agglomeration Kathmandu/Patan (Mishra et al. 2017). Bei Werten < 4 mg/l wird die fischkritische Konzentration erreicht, ab < 2 mg/l sterben die meisten aquatischen Organismen ab. Entsprechend steigt auch der biologische Sauerstoffbedarf, ein weiterer wichtiger Indikator für die Wasserqualität, entlang des Bagmati von 2,4 mg/l in

Sundarijal über 93 und 172 mg/l im Stadtgebiet Kathmandu/Patan auf knapp 200 mg/l im Unterlauf an. Flussabschnitte mit Werten > 15 mg/l gelten bereits als hochgradig verschmutzt. Der Unterlauf des Bagmati muss demnach als biologisch tot bezeichnet werden, der Bagmati gehört zu den am stärksten verschmutzten Flüssen der Welt. Das Wasser ist noch nicht einmal für Bewässerung in der Landwirtschaft geeignet. In diametralem Gegensatz zur katastrophalen Wasserqualität steht die große religiöse und kulturelle Bedeutung, die der Bagmati traditionell für die Hindus in Nepal besitzt, vergleichbar dem Ganges in Indien. Diese Bedeutung erfährt derzeit eine kritische Wandlung.

Die Verschmutzung des Oberflächenwassers im Kathmandu-Tal wirkt sich auch auf die Qualität des Grundwassers aus, von dem eine hohe Gesundheitsgefährdung ausgeht. Es gibt keine für die Trinkwasserversorgung genutzten Wasserquellen (Schacht-, Rohr-, Tiefbrunnen, Quellen, in Stein gefasste Wasserentnahmestellen), einschließlich des Leitungswassers, die durchgängig frei von Verunreinigungen mit Kolibakterien, Salmonellen und anderen pathogenen Enterobakterien sind. Die Belastung ist insbesondere dann hoch, wenn oberflächennahes Grundwasser genutzt wird sowie während der Monsunzeit. Eine einjährige Messkampagne an 10 Trinkwasserentnahmestellen ergab z.B., dass zwischen 63 und 84% aller Proben Typhus-Erreger (*Salmonella typhi*) und Paratyphus-Erreger (*Salmonella paratyphi* A) enthielen mit Höchstwerten von bis zu $2{,}5\times10^8$ CFU/100ml im August (Karkey et al. 2016). Der Konsum von mit pathogenen Enterobakterien verschmutztem Wasser führt zu Magen-Darm-Krankheiten wie Gastroenteritis, (chronische) Diarrhoe oder Ruhr, an denen ein großer Teil der Bevölkerung, insbesondere Kinder und Alte, leidet. Die chemische Kontamination des Grundwassers kommt vor allem in einem erhöhten Nitratgehalt von bis zu 200 mg/l zum Ausdruck. Die Mehrzahl der Proben liegt deutlich oberhalb des WHO-Richtwertes von 50 mg/l, was für Säuglinge ein erhöhtes Zyanoserisiko impliziert.

Wesentliche Ursache dieser extrem schlechten Qualität von Oberflächen- und Grundwasser ist die Verschmutzung durch Abfälle und Abwässer aus Haushalten und Industrie. Völlig unzureichende bis nicht existente Müllentsorgungs- und Abwasseraufbereitungssysteme führen dazu, dass etwa die Hälfte des Hausabfalls (feste organische Abfälle, Tierüberreste, Plastikmüll etc.) an den Flussufern oder in den Flüssen selbst entsorgt wird, und dass über 90% des Abwassers aus der Kanalisation ungeklärt in das Flusssystem gelangen, was einer Menge von 270 Mio. Liter pro Tag entspricht (Shrestha et al. 2017). Davon stammen 93% aus Haushalten und 7% aus der Industrie, darunter besonders belastete Abwässer aus Teppich-, Textil-, und Pharmaindustrie. Nur 30% der Haushalte sind indes überhaupt an das öffentliche Kanalnetz angeschlossen, die Abwässer der restlichen 70% werden dezentral über Sickergruben u.ä. entsorgt und gelangen aufgrund von Undichtigkeiten, nicht fachgerechter Entleerung oder nicht funktionierender Kläranlagen letztlich ebenfalls in Flüsse oder ins Grundwasser. Nur eine von 6 Kläranlagen im Kathmandu-Tal ist derzeit voll funktionsfähig. Hinzu kommt die Belastung der Wasserressourcen durch Agrochemikalien bzw. deren Rückstände aus der Landwirtschaft sowie hohe Arsen- und Eisenwerte des Tiefengrundwassers, die die Qualität des genutzten Wassers weiter herabsetzen. Die staatliche Trinkwasserversorgung reicht bei weitem nicht aus, es werden nur derzeit nur 19% (Trockenzeit) bzw. 31% (Monsunzeit) des Wasserbedarfs von 370 Mio. Litern pro Tag bereitgestellt, und nur 80% der Bevölkerung hat Zugang zu Leitungswasser. Nach Fertigstellung des Melamchi Water Supply Project, mit dem Wasser aus einem angrenzenden Einzugsgebiet ins Tal umgeleitet werden soll, wird eine Entlastung erwartet.



Abb. 3.4-6: *Der zu einem Abwasserkanal verkommene Bishnumati, kurz vor dem Zusammenfluss mit dem Bagmati (Photo © Udo Schickhoff, 02.03.2012).*

Implikationen des Klimawandels

Der Himalaya ist einer gegenüber dem globalen Mittel überdurchschnittlichen Erwärmung ausgesetzt, die sich auch in den nächsten Jahrzehnten fortsetzen wird (Schickhoff et al. 2016). Die rezente Erwärmung im Kathmandu-Tal beträgt etwa 0,4 °C pro Dekade, die Niederschläge zeigen eine leichte, statistisch aber nicht signifikante rückläufige Tendenz (GoN-MEWRI 2015). Es wird eine Zunahme monsunaler Niederschläge und eine Zunahme klimatischer Extremereignisse für die nächsten Dekaden prognostiziert (Krishnan et al. 2019). Der Klimawandel wird sich in komplexer Weise auf die Existenzgrundlage der Bewohner des Kathmandu-Tals auswirken, z.B. im Hinblick auf weitere Zuwanderung, soziale Beziehungen und Konflikte, Ökosystemleistungen, Ressourcenverfügbarkeit, Agrarproduktivität oder Gesundheit. Ohnehin bereits marginalisierte und vulnerable Bevölkerungsgruppen mit geringerer Kapazität zur Anpassung werden besonders betroffen sein. Die von der Luft- und Wasserverschmutzung ausgehende Gesundheitsgefährdung wird sich unter den Bedingungen des Klimawandels verschärfen. Mit ansteigenden Temperaturen und Niederschlägen erhöht sich auch das Risiko von Durchfallerkrankungen aller Art, insbesondere für Kinder. Bei zukünftig häufiger auftretenden Hitzewellen wird vermehrt Feinstaub und Ozon gebildet, so dass in erhöhtem Maße mit Herzkreislauf- und Atemwegserkrankungen zu rechnen ist. Hinzu kommt ein zunehmendes Risiko durch von Vektoren übertragene Krankheiten wie Malaria, Dengue-Fieber, Enzephalitis, Leishmaniose oder Filariose. Initiativen zur Anpassung an den Klimawandel in Nepal wie das »*Nepal Climate Change Support Programme*« oder das »*Pilot Program for Climate Resilience*« sind wichtige erste Schritte, um zur Milderung der Folgen des Klimawandels beizutragen; sie sollten ihren Fokus insbesondere auf die von Armut betroffenen Bevölkerungsschichten im Kathmandu-Tal erweitern, deren Bewohner nicht nur mit den Risiken von Umweltverschmutzung und Klimawandel leben müssen, sondern auch mit der latenten Erdbebengefahr. Die Bezeichnung »Risikolebensraum« ist daher mehr als gerechtfertigt.

Literatur

DONNER W. (1972): Nepal. Raum, Mensch und Wirtschaft. Wiesbaden: Otto Harrassowitz.

GoN-MEWRI (Government of Nepal, Ministry of Energy, Water Resources and Irrigation) (2015): Study of climate and climatic variation over Nepal. Kathmandu: Department of Hydrology and Meteorology (DHM).

GURUNG A. & M. L. BELL (2012): Exposure to airborne particulate matter in Kathmandu Valley, Nepal. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology 22: 235-242.

GURUNG A., J. L. LEVY & M. L. BELL (2017): Modeling the intraurban variation in nitrogen dioxide in urban areas in Kathmandu Valley, Nepal. Environmental Research 155: 42-48.

GUTSCHOW N. & H. KREUTZMANN (2012): Handlung schlägt Plan: Stadtentwicklung im Kathmandu-Tal (Nepal). Geographische Rundschau 04/2012: 42-49.

GUTSCHOW N. & H. KREUTZMANN (2013): Mapping the Kathmandu Valley: With aerial photographs by Erwin Schneider. Kathmandu: Himal Books.

HAFFNER W. (1979): Nepal Himalaya. Untersuchungen zum vertikalen Landschaftsaufbau Zentral- und Ostnepals. Wiesbaden: Franz Steiner Verlag.

HMG-MPE (His Majesty's Government of Nepal, Ministry of Population and Environment) (1999): Environmental Planning and Management of the Kathmandu Valley. Kathmandu: HMG-MPE.

ICIMOD (International Centre for Integrated Mountain Development) (2007): Kathmandu Valley environment outlook. Kathmandu: ICIMOD.

ISHTIAQUE A., M. SHRESTHA & N. CHHETRI (2017): Rapid urban growth in the Kathmandu Valley, Nepal: Monitoring land use land cover dynamics of a Himalayan city with landsat imageries. Environments 4: 72.

KARKEY A., T. JOMBART, A. W. WALKER et al. (2016): The ecological dynamics of fecal contamination and Salmonella Typhi and Salmonella Paratyphi A in municipal Kathmandu drinking water. PLoS Neglected Tropical Diseases 10: e0004346.

KARKI K. B., P. DHAKAL, S. L. SHRESTHA et al. (2016): Situation analysis of ambient air pollution and respiratory health effects in Kathmandu Valley, 2015. Kathmandu: Nepal Health Research Council.

KRISHNAN R., A. B. SHRESTHA, G. REN et al. (2019): Unravelling climate change in the Hindu Kush Himalaya: Rapid warming in the mountains and increasing extremes. In: WESTER P., A. MISHRA, A. MUKHERJI & A. B. SHRESTHA (eds.) The Hindu Kush Himalaya assessment, pp. 57-96. Cham: Springer.

MAJUMDER A. K., K. N. ISLAM, R. M. BAJRACHARYA & W. S. CARTER (2012): Assessment of occupational and ambient air quality of traffic police personnel of the Kathmandu Valley, Nepal; in view of atmospheric particulate matter concentrations (PM_{10}). Atmospheric Pollution Research 3: 132-142.

MISHRA B. K., R. K. REGMI, Y. MASAGO et al. (2017): Assessment of Bagmati river pollution in Kathmandu Valley: Scenario-based modeling and analysis for sustainable urban development. Sustainability of Water Quality and Ecology 9: 67-77.

PANDAY A. K. & R. G. PRINN (2009): Diurnal cycle of air pollution in the Kathmandu Valley, Nepal: Observations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 114(D09305).

RIMAL B., L. ZHANG, D. FU et al. (2017): Monitoring urban growth and the Nepal earthquake 2015 for sustainability of Kathmandu Valley, Nepal. Land 6: 42.

SAKAI H., H. SAKAI, W. YAHAGI et al. (2006): Pleistocene rapid uplift of the Himalayan frontal ranges recorded in the Kathmandu and Siwalik basins. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 241: 16-27.

SCHICKHOFF U., R. B. SINGH & S. MAL (2016): Climate change and dynamics of glaciers and vegetation in the Himalaya: An overview. In: Singh R. B., U. Schickhoff & S. Mal (eds.): Climate change, glacier response, and vegetation dynamics in the Himalaya. Contributions Toward Future Earth Initiatives, pp. 1-26. Cham: Springer.

SHAH J. J. & T. NAGPAL (eds.) (1997): Urban air quality management strategy in Asia. Kathmandu Valley report. Washington: The World Bank.

SHAKYA K. M., M. RUPAKHETI, A. SHAHI et al. (2017): Near-road sampling of PM2.5, BC, and fine-particle chemical components in Kathmandu Valley, Nepal. Atmospheric Chemistry and Physics 17: 6503-6516.

SHRESTHA P., R. SHRESTHA & B. DANGOL (2017): Status of wastewater generation and management in urban Nepal. Journal of Environment and Public Health 1: 1-6.

THAPA R. B., Y. MURAYAMA & S. ALE (2008): City profile Kathmandu. Cities 25: 45-57.

Kontakt:

Prof. Dr. Udo Schickhoff
Institut für Geographie - CEN Universität Hamburg
udo.schickhoff@uni-hamburg.de

Schickhoff U. (2019): Risikolebensraum Kathmandu (Nepal): Klima- und Umweltveränderungen im Urbanisierungsprozess einer Himalaya-Metropolregion. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. 99-105. www.warnsignal-klima.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.14.

3.5 La Paz, als Großstadt in Beckenlage in 3200-4000 m Höhe

Dirk Hoffmann

Der auf 3.650 m Höhe gelegene bolivianische Regierungssitz La Paz und die noch 400 m höher gelegene Schwesterstadt El Alto sind mit Abstand die höchstgelegenen Millionenstädte der Welt. Die Kessellage von La Paz hat zur Folge, dass sich Luftschadstoffe in der Stadt anreichern. Besonders während der Trockenzeit erreicht die Luftbelastung kritische Werte. Durch ihre Höhenlage sind La Paz und El Alto sehr anfällig für die Auswirkungen des Klimawandels: starke Gletscherschmelze, hohe Temperaturen, häufige Extremereignisse (Starkregen und Trockenheit). Die Anpassungsbemühungen der Stadtverwaltung von La Paz sind auf die Sicherstellung der Wasserversorgung und den Katastrophenschutz ausgerichtet und laufen relativ erfolgreich. Die Arbeiten in den ländlichen Gebieten zum Natur- und Wasserschutzgebiet laufen jedoch sehr langsam.

La Paz as »Million-City« in a deep basin at an altitud of 3200-4000 m: *The Bolivian seat of government La Paz, located at an altitude of 3,650 m, and the sister city El Alto, which is still 400 m higher, are by far the highest million-cities in the world. The geographical position of La Paz in a deep basin causes airborne pollutants to accumulate in the city. Especially during the dry season, air pollution reaches critical values. Due to their altitude, La Paz and El Alto are very vulnerable to the effects of climate change: strong glacier melt, high temperatures, frequent extreme events (heavy rain and drought). The adaptation efforts of the Municipality of La Paz are aimed at ensuring water supply and civil protection and are running relatively successfully. However, work in rural areas on a nature and water sanctuary is proceeding very slowly.*

Der höchstgelegene Regierungssitz der Welt

Die auf 3.650 m Höhe gelegene Stadt La Paz und ihre 400 m höher gelegene Schwesterstadt El Alto sind mit großem Abstand die beiden höchstgelegenen Millionenstädte der gesamte Welt (*Tab. 3.5-1*) (Borsdorf & Stadel 2013). Die besondere Lage von La Paz und El Alto wird auch aus den statistischen Ausführungen von Barbara Huddleston deutlich, wo festgestellt wird, dass lediglich 10% der Bergbevölkerung weltweit oberhalb einer Höhe von 2.500 m lebt (Huddleston et al. 2003).

Während der urbane Bereich des Regierungssitzes La Paz sich zwischen einer Höhe von 3.200 und 4.100 m über dem Meeresspiegel erstreckt, liegt El Alto auf der Altiplano-Hochebene zwischen 4.000 und 4.200 m Höhe und zeichnet sich durch seinen geringen Höhengradienten aus. Unberücksichtigt bleibt bei dieser Betrachtung der ländliche Bereich beider Munizipien, welcher mit der Spitze des 6.088 m hohen Huayna Potosí jeweils seinen höchsten Punkt erreicht. Das Munizip La Paz reicht mit seinem nördlichen ländlichen Bereich zudem bis auf weniger als 1.000 Höhenmeter in die subtropischen Yungas am Anden-Ostabhang hinab. Auch wenn dies durch keine Statistik belegt ist, dürfte kein anderes lokales Gemeinwesen weltweit einen ähnlichen Höhengradienten von mehr als 5.000 m aufweisen.

Die wissenschaftliche Debatte um die Auswirkungen des Klimawandels sowie die Anpassung an dessen Folgen bezogen auf die tropischen Anden konzentriert sich auf Hochgebirgsökosysteme und die ländlichen Bewohner (Anderson et al. 2011, Condesan 2012, Kaenzig 2012, Schoolmeester et al. 2018). »*Dorfgemeinschaften im Gebirge der tropischen Anden sind besonders verletzlich und klimatischen Gefährdungen ausgesetzt, was unter anderem an ihrer überproportional großen Armut sowie den spezifischen Umweltbedingungen der Gebirgswelt liegt*« (Schoolmeester et al. 2016, S. 7). Insbesondere unterliegt die Landwirtschaft im Hochgebirge den sich durch die globale Erwärmung verursachten klimatischen Veränderungen.

Palomo (2017) verweist darauf, dass die Betrachtung von Ökosystemleistungen es erlaubt die Auswirkungen des Klimawandels auf die biophysischen Bereiche, mit denen auf spezifische Bevölkerungsgruppen – wie Berggemeinschaften, Touristen oder auch flussabwärts gelegene Ansiedlungen – zu verbinden.

Die Existenz von großen Städten tritt kaum in Erscheinung. Dabei sprechen die Zahlen oft ein anderes Bild: In Bolivien leben weitaus mehr Menschen allein



Abb. 4.5-1: *Der Bau des Staudamms von Alto Hampaturi oberhalb von La Paz (2016).*

in den beiden Städten La Paz und El Alto als im gesamten ländlichen Hochgebirgsraum, selbst wenn man die sich über zehntausende Quadratkilometer erstreckende Hochebene des Altiplano mit einbezieht. Es ist also an der Zeit auch im Bereich der Hochgebirgsforschung diesen Perspektivwechsel zu vollziehen. Großstädte im Hochgebirge – wie La Paz – sind durch reduzierte Wasserverfügbarkeit, aber auch durch die Zunahme von Extremwetterereignissen und in deren Folge auftretenden Überschwemmungen und Erdrutschen an steilen Hängen gefährdet.

Auch wenn es der Forschung noch immer Probleme bereitet einzelne dieser Extremereignisse direkt auf den Klimawandel zurückzuführen, ist die Befundlage eindeutig: Da wärmere Luft eine größere Menge an Wasserdampf aufnehmen kann, stehen bei Starkregenereignissen zunehmend größere Wassermengen in der Atmosphäre zur Verfügung, die sich dann im Gebirge in kurzer Zeit auf kleiner Fläche abregnen können.

Die natürlich gegebene Gefährdung durch die Gebirgstopographie und die Lage von La Paz in einem Talkessel, wo sich kleine Bäche im steilen Terrain sehr schnell abwärts bewegen und sich mit weiteren anderen Bächen vereinigen, wird dann durch den Klimawandel verstärkt. Vermehrte Überschwemmungen sind also die zu erwartende Folge.

Der Metropolregion La Paz – El Alto

Allerdings ist es weder unter ökologischen noch unter sozio-ökonomischer Perspektive möglich allein die 1548 von den Spaniern gegründete Stadt La Paz zu betrachten, ohne ihr symbiotisches Verhältnis zur auf dem angrenzenden Hochplateau des Altiplano gelegenen Schwesterstadt El Alto mit in den Blick zu nehmen. Es handelt sich bei El Alto um die ehemalige Schlafstadt der in einem Talkessel gelegenen und ab Mitte des 20 Jahrhunderts stark expandierenden Stadt La Paz: »El Alto de La Paz«, frei übersetzt: die »Oberstadt von La Paz«, mit einer Einwohnerzahl von etwa 11.000 in den 40er Jahren des vorigen Jahrhunderts.

Nachdem die Nationale Revolution von 1952 die ländlich-indigene Bevölkerung des Andenraums von der zwangsweisen Anbindung an die Großgrundbesitzer befreite, kam es zu einer starken Migration in die Großstädte. Für den nördlichen Teil des bolivianischen Altiplano bedeutete dies zumeist die Ansiedlung in La Paz, bzw. auf der angrenzenden windigen Anhöhe des Altiplano auf mehr als 4.000 m Höhe. Die Gesamtbevölkerung Boliviens betrug zu diesem Zeitpunkt 2,5 Mio. Einwohner. El Alto zählte auch 1960 weniger als 30.000 Einwohner. So entstand El Alto als Migrationsstadt der Aymara-stämmigen Landbevölkerung des Hochlands, anerkannt als eigene Stadt seit 1985 mit einer geschätzten Einwohnerzahl von 400.000 (heute 2019 1 Mio.) und ist noch immer eine der am schnellsten wachsenden Großstädte des gesamten Andenraums

Die Stadt La Paz verzeichnet aufgrund ihrer Lage zwischen der Andenkordillere im Osten sowie der Abbruchkante des Altiplano im Westen – gleichzeitig die Stadtgrenze zu El Alto – seit Jahrzehnten ein geringeres Wachstum. Die aktuelle Einwohnerzahl von etwa 1 Mio. Einwohnern dürfte zukünftig nur sehr langsam ansteigen.

Tab. 3.5-1: *Die höchstgelegenen Großstädte der Welt (administrative Stadtgebiete). Nach Breckle.*

Name	Land	Meereshöhe	Ca. Einwohnerzahl
El Alto	Bolivien	4100m	1.000.000
La Paz	Bolivien	3700m	900.000
Quito	Ecuador	2850m	1.600.000
Toluca	Mexico	2650m	650.000
Bogota	Kolumbien	2600m	9.800.000
Cochabamba	Bolivien	2550m	650.000
Addis Abeba	Äthiopien	2450m	3.300.000
Sanaa	Yemen	2350m	2.500.000
Arequipa	Peru	2330m	1.000.000
Asmara	Eritrea	2320m	900.000
Naucalpan	Mexico	2300m	850.000
Xining	China	2280m	2.300.000
Mexico City	Mexico	2250m	8.500.000
Puebla	Mexico	2150m	1.500.000
Kumming	China	1900m	6.800.000
Johannesburg	S Afrika	1830m	2.000.000
Kabul	Afghanistan	1800m	4.200.000
Nairobi	Kenya	1700m	3.200.000

Stadtklima, Luftqualität und Hochgebirge

Die Kessellage von La Paz hat zur Folge, dass sich Luftschadstoffe unmittelbar in der Stadt anreichern (s. *Abb. 3.5-2*) und während der Trockenzeit nur langsam abtransportiert werden, was insbesondere bei Inversionswetterlagen zu einer hohen Schadstoffbelastung der Luft führt. Ursächlich für die Luftverschmutzung ist im Wesentlichen ein überalterter und technisch schlecht gewarteter Fuhrpark sowie die Verdopplung der PKW-Zahlen in den letzten 15 Jahren. Die unzureichende Verbrennung von Benzin- und Dieseltreibstoff auf einer Höhe von über 3.200 m sorgt für eine weitere Verschlechterung. Seitens der Stadtverwaltung von La Paz gibt es seit mehr als zehn Jahren unterschiedliche Bemühungen, der Verschlechterung der Situation entgegenzuwirken.

Da Städte aber nicht nur Opfer des Globalen Klimawandels sind, sondern durch die eigenen Emissionen – die im Falle von La Paz hauptsächlich aus dem Straßenverkehr herrühren – zur weiteren Anreicherung von Kohlendioxid in der Atmosphäre beitragen, hat La Paz eine Klimaschutzstrategie erarbeitet. Dazu gehört beispielsweise die Förderung des ÖPNV. So wurde der Aufbau eines öffentlichen Bus-Systems mit erdgasbetriebenen »Puma Katari«-Bussen chinesischer Herstellung eingeleitet. Parallel dazu wurde von der Zentralregierung mit dem Bau der ersten innerstädtischen Seilbahnverbindungen begonnen. Nachdem 2013 zunächst La Paz mit El Alto und das Zentrum mit dem Süden der Stadt verbunden worden sind, besteht das Seilbahnnetz aktuell aus zehn mit einander verbundenen Linien, die zusammen 33 km lang sind (s. *Abb. 3.5-3a-b*); weitere sind in Planung. Dies ist ein interessanter Ansatz zur Teillösung der Probleme in der Stadt. Die zum Teil spektakulären Ausblicke aus den Gondeln auf die Stadt und die umliegende Gebirgskulisse können jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass eine umfassende Lösung der innerstädtischen Verkehrsproblematik weiterhin aussteht. Eine Verringerung des städtischen Verkehrsaufkommens bei Mini-Bussen, Sammeltaxis, Taxis und privaten PKWs ist nicht erfolgt.



Abb. 3.5-2: *Smog im Talkessel von La Paz, mit dem Illimani im Hintergrund.*

Eine weitere Maßnahme der Stadtregierung kommt zwar nur an wenigen Tagen des Jahres zum Tragen, ist jedoch für die Bewusstseinsbildung bei der Bevölkerung von großer Bedeutung: Das Verbot der »San Juan«-Feuer zur Mitsommernachtsfeier, bei der traditionell in der ganzen Stadt auch überflüssiger Hausrat in den Flammen entsorgt wurde, was für tagelang andauernden Smog sorgte.

Wenig ausrichten kann die Stadt gegen die monatelangen aus dem Tiefland heraufwehenden Rauchwolken in der Zeit der jährlich zwischen Juli und Oktober stattfindenden Brandrodungen (»chaqueos«) in Amazonien. Ironischerweise haben in den letzten Jahren mehrfach vermutlich durch den Klimawandel hervorgerufene Regenfälle inmitten der Trockenzeit kurzfristig für Linderung gesorgt.

Die »fliegenden Flüsse« Amazoniens

Keinerlei Berücksichtigung in der Debatte um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit für die Städte La Paz und El Alto findet die Diskus-

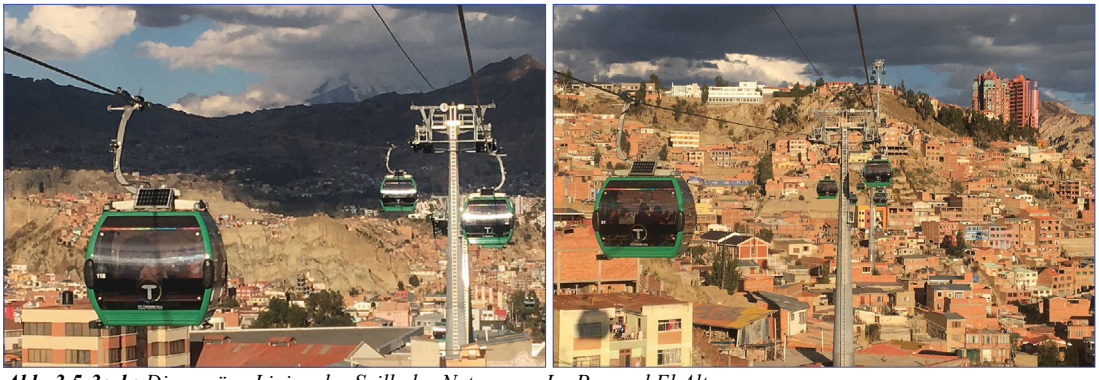


Abb. 3.5-3a-b: *Die »grüne Linie« des Seilbahn-Netzes von La Paz und El Alto.*

sion um die Herkunft der Niederschläge. Entgegen der naheliegenden Vermutung, die Niederschläge der bolivianischen Anden würden sich aus dem geographisch nahe gelegenen Pazifik speisen, handelt es sich jedoch um »recyceltes Atlantikwasser«. Die in Äquatorialnähe starke Verdunstung über dem Atlantik vor der Küste Brasiliens reichert die Luftmassen mit Feuchtigkeit an, die dann westwärts über die Amazonasregion getrieben werden und sich dort in mehreren Zyklen abregnen, verdunsten und nach Westen weitergetrieben werden. Der brasilianische Wissenschaftler Antonio Nobre (2014) hat für dieses Phänomen zur besseren Veranschaulichung den Begriff der »fliegenden Flüsse« geprägt.

Stoßen die feuchtwarmen Luftmassen an die Gebirgskette der Anden, regnen sie sich ab und werden nach Süden (und weiter nach Südosten) abgelenkt. Ersetzt man nun den tropischen Regenwald des Amazonas in immer stärkerem Maße durch Weideland und Sojaplantagen, wird die Evapotranspiration verringert und folglich die Regenmenge reduziert. Die in diesen Ausmaßen und in dieser schnellen Folge unbekannten Dürren in Amazonien in den Jahren 2005, 2010 und 2015/16 sind beredtes Beispiel hierfür.

Vor diesem Hintergrund sind die von der bolivianischen Regierung beförderten großflächigen Brände im Tiefland in der diesjährigen Trockenzeit - die nach ersten Schätzungen eine Fläche von insgesamt vier bis fünf Millionen Hektar Land betreffen (FAN 2019) – nicht nur katastrophal für die direkt betroffenen Gebiete, sondern auch für die Bewohner des andinen Landesteils.

Die Auswirkungen des Klimawandels

Unter Wissenschaftlern besteht Einigkeit, dass neben den tiefgelegenen Küstengebieten die Hochgebirge zu den am stärksten vom Klimawandel betroffenen Regionen zählen, und dass diese auch zukünftig mit überproportional großen Auswirkungen zu rechnen haben (Hoffmann & Requena 2012). Der 2019 vom »Weltklimarat« IPCC (*International Panel on Climate Change*) vorgestellte »Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre« (SROCC) unterstreicht diese Sorge auf eindringliche Weise.

Die Debatte um die Auswirkungen des Klimawandels auf La Paz hat seit mehr als zehn Jahren das Schmelzen der Gletscher in den angrenzenden Bergen und die Gefährdung der städtischen Wasserversorgung in den Vordergrund gerückt (Buytaert & De Bièvre 2012, Buytaert et al. 2017, Vuille et al. 2015). An zweiter Stelle steht die Besorgnis um die Auswirkungen von vermehrt auftretenden Extremniederschlägen. Der deutlichen Temperaturzunahme (Vuille 2013), die im Hochgebirge etwa das Doppelte des globalen Durchschnitts beträgt (Bradley et al. 2006) wird geringere Bedeutung zugemessen, was bei einer Jahresdurchschnittstemperatur von 10 Grad Celsius gut nachvollziehbar ist.

»*Gegen Ende dieses Jahrhunderts werden die kältesten Jahre in den tropischen Anden wärmer sein als die wärmsten Jahre, an die sich Menschen und andere Arten bislang angepasst haben*« (eigene Übersetzung), stellt ein Bericht des Umweltprogramms der Vereinten Nationen zur Klimawandelanpassung im Gebirge fest (Schoolmeester 2016, S. 6). In den tropischen Anden, die sich von Venezuela über Kolumbien, Ekuador und Peru bis nach Bolivien erstrecken, leben mehr als 60 Mio. Menschen in einer Höhe von mehr als 1.000 m über dem Meeresspiegel (Cuesta 2012).

Der »*Schwarze Februar« 2002*

Der später so genannte »Schwarze Februar« von 2002 stellt eine Zäsur im Umgang der Stadt La Paz mit der Gefahr von »Naturkatastrophen« dar. Gegen Ende der Regenzeit im Februar 2002 kam es zu einem lokal begrenzten und nur wenige Minuten dauernden, ungewöhnlich starken Niederschlagsereignis, bei dem

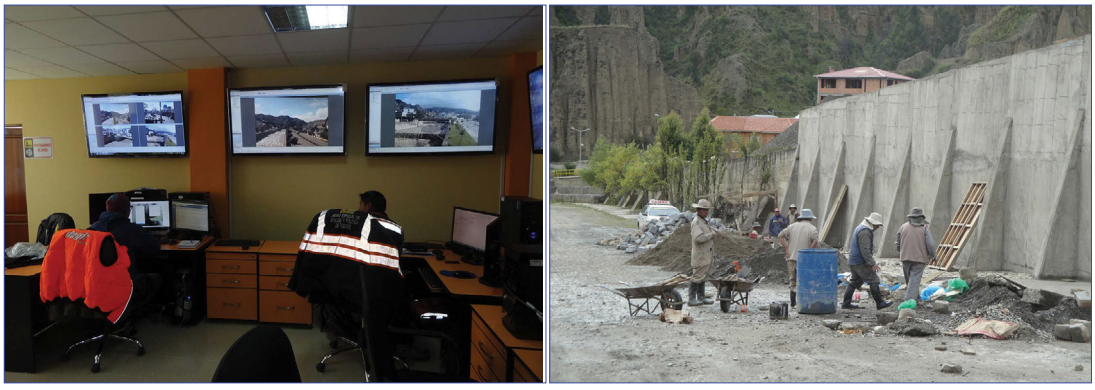


Abb. 4.5-4a-b: *Anpassung an den Klimawandel in La Paz. Das Zentrum für den Katastrophenschutz (links) und die Erhöhung der Mauern der Gebirgsflüsse (rechts).*

innerhalb von sehr kurzer Zeit zunächst ein starker Hagelschauer im Zentrum von La Paz niederging. Die Hagelkörner verstopfen im Zusammenspiel mit dem angehäuften Müll die Regenwasserabflüsse, so dass es innerhalb kürzester Zeit zu Sturzbächen und Überschwemmungen kam. Einige der zentralen Straßen des Regierungssitzes verwandelten sich in tosende Flüsse, von denen selbst PKWs fortgespült wurden. Es ertranken mehr als 60 Menschen inmitten des Stadtzentrums, einige von ihnen vor laufenden Kameras.

Die Stadt stand zunächst unter Schock, denn ein derartiges Ereignis hatte es noch nie gegeben. Doch fungierte dieser »Schwarze Februar« als Weckruf für die Stadtverwaltung; nicht noch einmal wollte man sich von einem Naturereignis derart überraschen lassen. Es wurden fortan vor Beginn der Regenzeit die Abflüsse gereinigt und von Unrat befreit. Gleichzeitig begann man mit dem Aufbau eines Frühwarnsystems und der Schaffung eines operativen Zentrums der Katastrophenvorsorge, dem *Centro de Gestión Integral de Riesgo* (*Abb. 3.5-4a-b*).

Damit war La Paz das erste Munizip Boliviens, welches über ein eigenes Frühwarnsystem verfügt. Möglich wurde dies unter Anderem Dank der Finanzierung durch die Vereinten Nationen sowie mithilfe der Unterstützung der Partnerstadt Bonn.

Der »Mega-Hangrutsch« von Callapa

Die »Feuertaufe« bestand das Frühwarnsystems im Jahr 2011, als es nach wochenlangen Regenfällen im Bereich Callapa zu einer großflächigen Hangrutschung kam (Nuñez-Villalba 2015). Obwohl bei diesem »Mega-Hangrutsch« etwa 500 Häuser zerstört wurden, konnten sämtliche Bewohner rechtzeitig evakuiert werden. Eine enorme Leistung, denn hier hätte es leicht mehrere Hundert Tote geben können, wenn das Monitoringsystem der Stadtverwaltung sowie die soziale Kommunikation mit der betroffenen Bevölkerung im Vorfeld nicht funktioniert hätten.

Gletscherschmelze und Wassermangel

Zu den Funktionen der Gletscher gehört die Regulierung des Wasserhaushalts, die Speicherung von Wasser und die Aufrechterhaltung der hochandinen Ökosysteme mit ihren Seen und Feuchtwiesen. Verschiedene wissenschaftliche Studien und Publikationen (Bliss et al. 2014, Radic & Hock 2014) belegen eindrucksvoll das durch die Globale Erwärmung verursachte Schmelzen der Gletscher weltweit. Auch für die tropischen Anden ist der Verlust von mehr als der Hälfte der Gletschermasse im Laufe der letzten vier Jahrzehnte gut dokumentiert (Rabatel et al. 2013, Soruco et al. 2015).

Eine ausführliche Diskussion der Auswirkungen des Klimawandels auf die Gletscher findet sich bei Hoffmann (2015a S.74). »*Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für die Wasserversorgung von La Paz und El Alto die Gletscher eine reale Bedeutung haben, aber die zukünftige Entwicklung der Wasserressourcen sehr viel stärker von der Entwicklung des Niederschlagsverhaltens abhängt. Vielmehr jedoch noch als von diesen naturwissenschaftlichen Parametern hängt die Wasserversorgung der mehr als 2 Mio. Einwohner der Metropolregion vom zukünftigen Bevölkerungswachstum sowie dem Trinkwassermanagement der zuständigen Institutionen ab*«, heißt es dort (siehe auch *Abb. 4.5-5a-b*).

Wie von Hoffmann (2015a) dargestellt, betrifft der Verlust der Gletscher in erster Linie den Wasserkreislauf und die hochandinen Ökosysteme und wirkt sich erst im weiteren Verlauf auf die Wasserversorgung des Ballungsraums La Paz-El Alto aus. Während die Gletscherschmelze in den Wassereinzugsgebieten der Talsperren von La Paz und El Alto bisher während der Trockenzeit eine zusätzlich zur Verfügung stehende Wassermenge bedeutete, dürfte der »*peak water*« (Mark et al. 2017) genannte Scheitelpunkt dieses Zuflusses in die Speicherbecken bereits überschritten sein. Für die Trinkwasserversorgung von La Paz und El Alto bedeutet dies, dass man sich in den nächsten



Abb. 4.5-5a-b: *Der Stausee von Milluni vor dem gletscherbedeckten Huayna Potosí (links) und ein aufgestauter natürlicher See in Hampaturi.*

Jahren auf das Fehlen von 10-12 Prozent der aktuell zur Verfügung stehenden Wassermenge einstellen muss (Soruco et al. 2015, Kinouchi et al. 2019).

Anpassungsstrategien

Was kann eine Großstadt des Globalen Südens nun angesichts dieser durch den Klimawandel verschärften Problemlage tun? Wie kann La Paz eine ausreichende Katastrophenvorsorge betreiben und sich an die derzeitigen und zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels anpassen? (Hoffmann 2015b)

Das munizipale Natur- und Wasserschutzgebiet Hampaturi (Abb. 4.5-5a-b)

Hinsichtlich der Sicherstellung der zukünftigen Wasserversorgung verfolgt die Stadt eine mehrgleisige Strategie. Auf der einen Seite finden seit mehreren Jahren Verhandlungen mit der Zentralregierung, der Stadtregierung von El Alto sowie mehreren kleineren Munizipien über die Übertragung und Neuaufteilung der Wasserversorgung im metropolitanen Großraum statt; bisher allerdings ohne greifbares Ergebnis.

Zu einer ersten großen Trinkwasserkrise in La Paz ist es Ende 2016 gekommen, als weite Teile der Stadt monatelang ohne regelmäßige Wasserversorgung auskommen mussten (Hoffmann 2016). Das zuständige Ministerium hatte Anfang November ohne Vorankündigung mehreren Stadteilen die Wasserversorgung gesperrt, weil die Speicher für die südlichen Stadtbezirke leer waren. Der Staat zeigte sich überrascht, obwohl die Existenz eines starken El Niño-Ereignisses lange bekannt war (Zuazo 2019). Auch wusste man seit Beginn des Jahrhunderts, dass zusätzliche Speicherkapazitäten für die wachsende Doppelstadt gebraucht würden. Diese Episode zeigt auch, dass mit einem pünktlichen Eintreten der Regenzeit nicht mehr gerechnet werden kann, sondern mit der Komponente »Unsicherheit« geplant werden muss. Zuazo legt in ihren Ausführungen dar, inwiefern die Trinkwasserkrise eine Zäsur für die Stadt La Paz bedeutet: Auf Seite der Stadtverwaltung führte sie zu einer Öffnung hin zu transformativer Anpassung und der Entwicklung einer stärker holistischen Sicht auf die Wasserversorgung, die nicht nur den Klimawandel, sondern auch den Schutz der Wassereinzugsgebiete im Hochgebirge umfasst.

Immerhin hat die Zentralregierung mithilfe internationaler Unterstützung im Jahr 2017 den zusätzlichen Speichersee »Hampaturi Alto« in Betrieb genommen und damit für ein wenig Entspannung gesorgt bei der Wasserversorgung (*Abb. 4.5-6a-b*) (*Abb. 4.5-1*).

Auf der anderen Seite betreibt die Stadtverwaltung den Prozess der Ausweisung eines Natur- und Wasserschutzgebietes in den hochgebirgigen ländlichen Sektoren des Gemeindegebiets in Hampaturi (*Abb. 4.5-6a-b*). Trotz der Zusammenarbeit mit der Umweltorganisation WCS und einer Anfangsfinanzierung durch die Andine Investitionsbank CAF ist die partizipative Erstellung eines ersten Managementplans an politisch motivierten Widerständen gescheitert.

Geplant ist in Hampaturi, durch nachhaltige Beweidung und Bewirtschaftung auf einer 20.000 ha großen Fläche die Erosion zu bekämpfen und gleichzeitig die Produktion ökologischer Lebensmittel durch die lokalen Dorfgemeinschaften in unmittelbarer Stadtnähe zu ermöglichen. Die Möglichkeit, über ökologische Kompensationszahlungen (»*payment for environmental services*« – PES) der städtischen Wasserverbraucher an die Bergbewohner deren nachhaltige Lebens- und Produktionsweise zu unterstützen im Gegenzug für den Schutz der natürlichen Wasserressourcen, existiert bisher nicht, denn es besteht ein generelles Verbot der Regierung von Evo Morales. Die Bezahlung von Ökosystemleistungen wird als »Merkantilisierung der Mutter Erde« abgelehnt.

Klimawandel und Hochgebirge in der internationalen Debatte

Die Vorschläge der Studie des Umweltprogramms der Vereinten Nationen zur Klimawandelanpassung im tropischen Andengebirge umfassen die Ausweitung und Vertiefung der Forschung, den Fokus auf die zentralen Risikofaktoren, den Einsatz von ökosystembasierten Anpassungsmaßnahmen (»*ecosystem-based adaptation*« – EbA), die Stärkung technischer Anpassungskapazitäten, die Einbeziehung traditionellen Wissens und die Verbesserung der politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen (Schoolmeester 2016).

Da der Klimawandel nicht der einzige Faktor mit negativen Auswirkungen auf Biodiversität und Lebensbedingungen im Hochgebirge ist (Spehn et al. 2006), müssen Anpassungsstrategien auch immer sozio-ökonomische Komponenten umfassen, welche die Bergbewohner selbst in den Mittelpunkt stellen.

In der Abschlusserklärung des unlängst von der Weltwetterorganisation WMO in Genf veranstalteten »Hochgebirgs-Gipfels« (*High Mountain Summit*, WMO 2019) wird die Bedeutung der Gebirgsregionen für die Erreichung der Nachhaltigen Entwicklungsziele (*Sustainable Development* Goals – SDGs) der Vereinten Nationen unterstrichen. Die Teilnehmer aus mehr als 50 Mitgliedsstaaten der WMO fordern dort u.a.

- die Rolle der Gebirgsregionen und ihrer Bedeutung für die ökonomischen und kulturellen Aktivitäten weit über sie hinaus anzuerkennen;
- das Bewusstsein für die Auswirkungen des Klimawan-



Abb. 4.5-6a-b: *Lokale Bevölkerung bei einer gemeinsamen Begehung des geplanten Natur- und Wasserschutzgebietes von Hampaturi mit der Stadtverwaltung von La Paz.*

dels auf Bergbewohner und Anrainer flussabwärts zu stärken;
- die Lücken in der Datenverfügbarkeit für die Gebirgsregionen weltweit schließen zu helfen;
- nachhaltige Entwicklung von Gebirgsregionen und den Erhalt von Berg-Ökosystemen in die Programme der internationalen Entwicklungszusammenarbeit zu integrieren; sowie
- ein Internationales Jahr der Berge, von Schnee und Eis durch die Vereinten Nationen ausrufen zu lassen.

Literatur

ANDERSON E. P., J. MARENGO, R. VILLALBA et al. (2011): Consequences of climate change in the tropical Andes. In. Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes, Hrsg.: Herzog S. K., R. Martínez, P. M. Jorgensen & H. Tiessen. Sao Jose dos Campos: Inter-American Institute for Global Change Research, 1-18.

BLISS A., R. HOCK & V. RADIC (2014): Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change, J. Geophys. Res. Earth Surf., 119, 717–730, doi:10.1002/2013JF002931.

BORSDORF A. & C. STADEL (2013): Die Anden. Ein geographisches Porträt. Berlin und Heidelberg.

BRADLEY R., M. VUILLE, H. DÍAZ & W. VERGARA (2006): Threats to water supplies in the tropical Andes. Science, 312: 1755-1756.

BUYTAERT W. & B. DE BIÈVRE (2012): Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. Water Resources Research, Vol. 48, W08503, doi:10.1029/2011WR011755.

BUYTAERT W., S. MOULDS, L. ACOSTA et al. (2017): Glacial melt content of water use in the tropical Andes. Environ. Res. Lett. 12 (2017) 114014

CONDESAN (2012): Sustainable Mountain Development in the Andes – from Rio 1992 to 2012 and beyond. Lima, Peru. *http://www.mountainpartnership.org/fileadmin/user_upload/mountain_partnership/docs/ANDES%20FINAL%20Andes_report_eng_final.pdf.*

CUESTA F. (2012): Panorama andino de cambio climático: Vulnerabilidad y adaptación en los Andes Tropicales. Portal CONDESAN. *https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Cuesta/publication/261216340_Panorama_andino_de_cambio_climatico_Vulnerabilidad_y_adaptacion_en_los_Andes_Tropicales/links/0a85e5339f57a7590c000000/Panorama-andino-de-cambio-climatico-Vulnerabilidad-y-adaptacion-en-los-Andes-Tropicales.pdf* (aufgerufen 03.11.2019).

FAN (2019): *http://incendios.fan-bo.org/Satrifo/mapa-interactivo/*

HOFFMANN D. & C. REQUENA (2012): Bolivia en un mundo 4 grados más caliente. Escenarios sociopolíticos ante el cambio climático para los años 2030 y 2060 en el altiplano norte. La Paz: Instituto Boliviano de la Montaña und Fundación PIEB, 168 pp.

HOFFMANN D. (2015a): Auswirkungen des Klimawandels auf die tropischen Gletscher Boliviens. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Kasang, D. & H. Escher-Vetter (Hrsg.). Warnsignal Klima: Das Eis der Erde. *http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2015/11/hoffmann.pdf.*

HOFFMANN D. (2015b): Navegando futuro: dos experiencias de cambio climático en Bolivia. Fundación Friedrich Ebert, La Paz. 188 pp. *http://library.fes.de/pdf-files/bueros/bolivien/12100.pdf.*

HOFFMANN D. (2016): La Paz, ciudad maravillosa sin agua. Klimablog, 5. Dez. 2016. *https://www.cambioclimatico-bolivia.org/pdf/cc-20161205-la_paz_ciu_.pdf.* (aufgerufen 03.11.2019).

HUDDLESTON B., E. ATAMAN, P. DE SALVO et al. (2003): Towards a GIS-based analysis of mountain environments and populations. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

IPCC (2019): Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Hrsg.: Pörtner H.-O., D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte et al.

KAENZIG R. (2015): Can glacial retreat lead to migration? A critical discussion of the impact of glacier shrinkage upon population mobility in the Bolivian Andes. Population and Environment 36(4): 480-496.

KINOUCHI T., T. NAKAKIMA, J. MENDOZA et al. (2019): Water security in high mountain cities of the Andes under a growing population and climate change: A case study of La Paz and El Alto, Bolivia. Water Security 6.

MARK, B. G., A. FRENCH, M. BARAER et al. (2017): Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes. Global and Planetary Change 159: 61-76

PALOMO I. (2017): Climate Change Impacts on Ecosystem Services in High Mountain Areas: A Literature Review. Mountain Research and Development, Vol 37, No 2, May 2017: 179-187.

NOBRE A. D. (2014): O futuro climático da Amazônia-relatório de avaliação científica. Articulación Regional Amazônica–ARA. São José dos Campos, 2014.

NUÑEZ-VILLALBA J. (2015): Crecimiento urbano y el monitoreo espacial de desastres en una ciudad andina: el caso de la aglomeración urbana de La Paz – El Alto , Bolivia. GEOUSP 19. 362-373.

RABATEL A. and 27 others (2013): Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. Cryosphere, 7(1): 81-102 (doi: 10.5194/ tc-7-81-2013).

RADIC V. & R. HOCK (2014): Glaciers in the Earth's Hydrological Cycle: Assessments of Glacier Mass and Runoff Changes on Global and Regional Scales Surv Geophys 35: 813-837, DOI 10.1007/s10712-013-9262-y.

SCHOOLMEESTER, T., M. SARAVIA, M. ANDRESEN, J. POSTIGO, A. VALVERDE, M. JUREK, B. ALFTHAN & S. GIADA (2016): Outlook on climate change adaptation in the Tropical Andes mountains. Mountain Adaptation Outlook Series. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal and CONDESAN. Nairobi, Arendal, Vienna and Lima.

SCHOOLMEESTER T., K. S. JOHANNSEN, B. ALFTHAN et al. (2018): Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. UNESCO and GRID-Arendal.

SORUCO A., C. VICENT, A. RABATEL et al. (2015): Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16°S). *https://www.igsoc.org/annals/56/70/a70a001.pdf.*

SPEHN E. M., M. LIBERMAN & C. KÖRNER (eds.) (2006): Land Use Change and Mountain Biodiversity. CRC Press, Boca Raton, FL 2006. ISBN 0 8493 3523 X, xiii + 362 pp.

VUILLE M. (2013): Climate Change and Water Resources in the Tropical Andes. Inter-American Development Bank, Technical Note No. IDB-TN-515. 29 pp.

VUILLE, M., E. FRANQUIST, R. GARREAUD et al. (2015): Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. J. Geophys. Res. Atmos., 120, 3745–3757, *https://doi.org/10.1002/2015JD023126.*

WMO (World Meteorological Organization) (2019): High Mountain Summit: Mountain weather, water, and climate: pathways to a sustainable global future. Call for Action. Genf, 31. Oktober 2019.

ZUAZO M. (2019): Adaptación al cambio climático y sostenibilidad en ciudades. Los casos de Lima y La Paz, trAndeS Working Paper Series 10, Berlin: Lateinamerika-Institut, Freie Universität Berlin (trAndeS ist tatsächlich die Schreibweise des Projekts).

Kontakt:
Dirk Hoffmann
Instituto Boliviano de la Montaña (BMI)
dirk.hoffmann@berlin.de

Hoffmann D. (2019): La Paz, als Großstadt in Beckenlage in 3200-4000 m Höhe. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 106-112 Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.15.

4 GESUNDHEITLICHE GEFÄHRDUNGEN IN STÄDTEN

Die noch immer hohe Luftverschmutzung in Städten durch Verkehr, Fabriken, Heizungen etc. gefährdet die Gesundheit der Menschen in hohem Maße (Kap. 4.2). Das wird durch die Erderwärmung verstärkt. Hohe Temperaturen treten meist bei starker Sonnenstrahlung und Windschwäche auf. Die dann hohe Ultraviolett-Strahlung zusammen mit der hohen Luftverunreinigung regt die fotochemische Ozonproduktion an (Kap. 4.4). Nach der Weltgesundheitsorganisation ist die Luftverschmutzung weltweit neben den Wetterextremen das größte Umweltrisiko für die Gesundheit der Menschen (Kap. 4.3). Fast jährlich gibt es tausende Tote aufgrund von Hitzewellen (Kap. 4.1).

Die städtische Wärmeinsel begünstigt auch die Vermehrung wärmeliebender Organismen. So breitet sich *Ambrosia* überall in Europa aus, deren Pollen, heftige allergische Reaktionen hervorrufen. Die Folge des Klimawandels ist oft mehr Pollen, – längere Pollenflugperioden und höhere Pollenkonzentrationen. Zu den wärmeliebenden Tieren gehören auch die Zecken, die Krankheiten wie die Borreliose (Bakterieninfektion) und die Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME) (Vireninfektion) übertragen (Kap. 4.5). Die Erreger breiten sich mit der Erwärmung polwärts aus.

4.1 Der Einfluss urbaner Hitze auf die menschliche Gesundheit

Juliane Kemen & Thomas Kistemann

Die Zunahme langer Episoden extremer Hitze in den vergangenen Jahrzehnten hat einen Anstieg hitzeassoziierter Morbidität und Mortalität zur Folge, insbesondere in Verbindung mit den Charakteristika des städtischen Klimas, die zur Ausbildung urbaner Hitzeinseln führen. In Städten und Kommunen steht daher zunehmend neben dem Klimaschutz die gesundheitsbezogene Klimaanpassung im Fokus. Gemäß den Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) spielt dabei die Entwicklung von Hitzeaktionsplänen eine wichtige Rolle.

***Urban Heat as a health burden:** The characteristics of cities are generating urban heat islands. The increase of episodes of extreme heat during the last decades is a major health burden. Heat waves in populated areas are accompanied by an increase of morbidity and mortality. Preparedness for climate change includes mitigation as well as health-related adaptation. Heat-Health Action Plans as recommended by World Health Organization (WHO) play an important role.*

Hitzeassoziierte Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland finden sich insbesondere in den Sommermonaten auf den Titelseiten der Zeitungen und in aller Munde. Die ausgedehnten sommerlichen Hitzeperioden der Jahre 2018 und 2019 führten der Bevölkerung, ebenso wie die seit Jahren veröffentlichten wissenschaftlichen Szenarien, den lokalen Änderungsprozess plastisch vor Augen. Die Ergebnisse des IPCC-Berichts zeigen an, dass nicht nur Stürme, Niederschläge und Überschwemmungen, sondern auch Hitze- und Dürreperioden sowohl in Anzahl als auch an Stärke zunehmen werden (IPCC 2014).

Besiedelte Gebiete sind sowohl als Motor als auch als Opfer dieser Entwicklung zu betrachten. Städten kommt auf Grund ihrer technischen und ökonomischen Möglichkeiten eine besondere Rolle zu. Dabei ist man in den Kommunen längst über den reinen Klimaschutz hinaus. Neben der Vermeidung von klimaschädlichen Treibhausgasen (Mitigation) geht es auch um die Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsstrategien (Adaptation) (Rösler 2012).

Wie aber kommt es zur Wärmeentwicklung in der Stadt im Vergleich zum weniger dicht besiedelten Umland? Welche Auswirkungen hat die thermische Belastung auf die menschliche Gesundheit? Dieses Kapitel adressiert diese Fragen und stellt Hitzeaktionspläne als eine notwendige Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel vor.

Wärme in der Stadt

Die Unterschiede zwischen dem Stadtklima und dem nicht-bebauten Umland prägen sich in mehreren Charakteristika aus. So finden wir in der Stadt zwar niedrigere UV-Strahlung (im Sommer bis zu -5%), eine geringere Sonnenscheindauer (im Sommer bis zu -8%) und eine niedrigere Globalstrahlung (bis zu -10%), aber durch die Veränderungen der Albedo, eine erhöhten Gegenstrahlung (bis zu +10%), eine starke Wärmespeicherung in Untergrund und Bauwerken (bis zu +40%), geringere Windgeschwindigkeiten (bis zu -20%) und

einem um bis zu 50% erhöhten sensiblen Wärmestrom sowie deutlich stärkerer Luftverschmutzung kommt es im Jahresmittel zu einer ca. +2 K höheren Lufttemperatur (nach Hupfer & Kuttler 2005). Auf Grund unterschiedlicher Stadtgröße und -struktur kann es hier aber auch zu Unterschieden von bis zu 15 K kommen (Kuttler 2004). Das Klima kann auch innerhalb einer Stadt stark divers sein, wie Kuttler et al. (2015) zeigen konnten: Innerhalb der Stadt Essen variierte die Anzahl heißer Nächte (Temperaturen > 20 °C) in unterschiedlichen Stadtvierteln zwischen 2 und 11 Tagen.

Die geringere Albedo vieler innerstädtischer Oberflächen führt zu einer starken Absorption solarer Strahlung; infrarote Strahlung wird in Straßenschluchten zwischen mehrgeschossigen Bauten zurückgehalten, zudem tragen zahlreiche anthropogene Wärmequellen aus Haushalt und Verkehr ihren Teil bei (Stewart & Oke 2012). Der Effekt des Temperaturunterschieds zwischen urbanen und ländlichen Regionen wird als urbane Hitzeinsel bezeichnet (Balchin & Pye 1947). Der Klimawandel und die steigenden Durchschnittstemperaturen akzentuieren diesen Effekt. Für die Bewohner einer Stadt bedeutet das eine Zunahme der negativen Folgen von Hitze, wie Untersuchungen in Berlin im Vergleich mit Brandenburg auch für Deutschland zeigen konnten (Scherer et al. 2013; Gabriel & Endlicher 2011). Der Zusammenhang zwischen Stadtgröße und der Entwicklung urbaner Hitzeinseln wurde bereits in den 1970er Jahren beschrieben (Oke 1973). Während dieser Effekt

Zur Relevanz der Definition von Hitzewellen

Ausgangspunkt der einfachsten Definition einer Hitzewelle ist eine andauernde Periode atmosphärischen Hitzestresses, die für zahlreiche Hitzefolgen ursächlich ist und eine Anpassung der Bevölkerung erfordert. Für die Bewertung einer Hitzewelle sind das übliche lokale Klima, die Tages- und Nachtemperatur und die Dauer des Ereignisses vergleichend zu betrachten (Robinson 2001). Der Deutsche Wetterdienst (DWD) spricht von einer Hitzewelle, wenn es an drei aufeinander folgenden Tagen über 28°C heiß ist und gleichzeitig das 98-Perzentil des Referenzzeitraums (1961-1990) überschritten wird (DWD 2019).

Die Betrachtung von Hitzewellen als Periode mehrerer heißer Tage im Vergleich zum Auftreten einzelner heißer Tage ist von besonderer Relevanz, da die hitzebedingte Sterblichkeit in und nach der zweiten heißen Nacht besonders hoch ist (Kalkstein 1993). In Deutschland hat es zwischen 1971 und 2000 2,7 Hitzewellen pro Jahr mit einer durchschnittlichen Dauer von 4,9 Tagen (13,2 Tage pro Jahr) gegeben (Zacharias & Koppe 2015). Unterschiedliche Definitionen erschweren die vergleichende Untersuchung hitzebedingter Sterblichkeit, da keine Einigkeit über die Abgrenzung in Bezug auf Dauer, Intensität etc. herrscht.

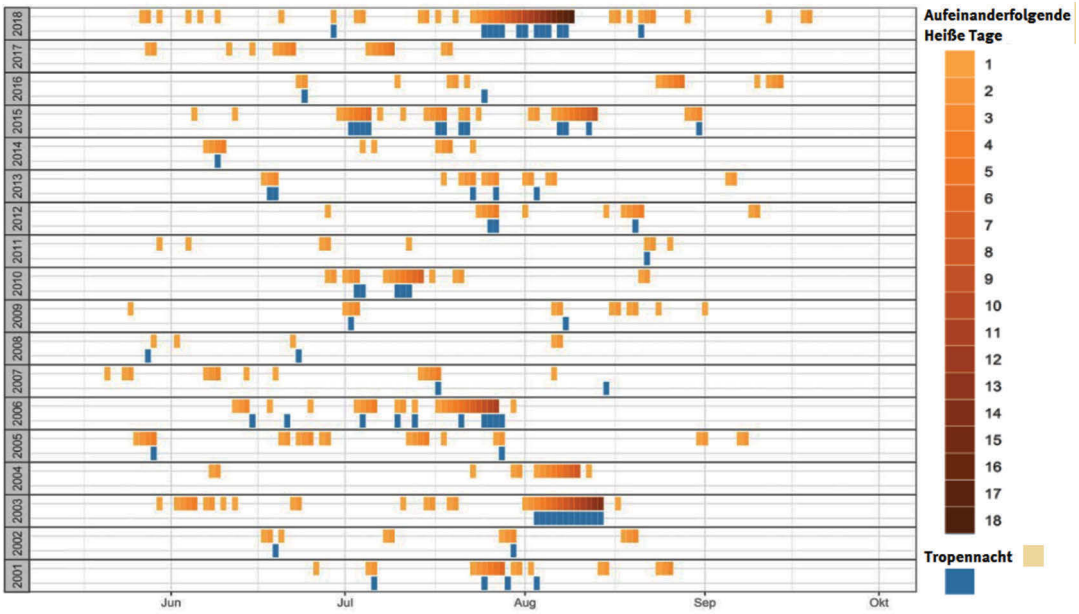


Abb. 4.1-1: *Heiße Tage und Tropennächte 2001 bis 2018 in Frankfurt a.M., auf Grundlage von Daten des Deutschen Wetterdienstes (UBA 2018).*

zuvor im Zusammenhang mit dem Wachstum von Städten betrachtet wurde, wurden in dieser Untersuchung in Kanada erstmals Städte unterschiedlicher Größe zum gleichen Zeitpunkt verglichen. Die Größe der betrachteten Städte stellte sich dabei als maßgeblich für das Gefälle zwischen Land und Stadt heraus (Oke 1973). Neben den Tagestemperaturen kommt auch der nächtlichen Abkühlung eine Bedeutung für die menschliche Gesundheit zu. Der Organismus kann wesentlich schlechter regenerieren, wenn es nach einem heißen Tag (≥ 30 °C) auch nachts über 20 °C bleibt. Das Umweltbundesamt wertete das Auftreten heißer Tage in Kombination mit den sogenannten »Tropennächten« in den vergangenen 18 Jahren aus (*Abb. 4.1-1*). Dabei zeigte sich für den Extremsommer 2018 eine besonders lang andauernde Hitzewelle mit zahlreichen Tropennächten.

Neben den Temperaturunterschieden hat auch die Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit eine Bedeutung für die menschliche Gesundheit. Tagsüber ist diese in der Stadt meist niedriger als im ländlichen Umland, nachts kommt es jedoch häufig zu ähnlichen Werten (Kuttler 2004).

Ursächlich für diese Unterschiede sind neben makroskaligen Gegebenheiten wie der Klimazone und geographischen Unterschieden die Stadtgröße, die Einwohnerzahl, die Flächennutzung, die Bodenversiegelung sowie Unterschiede in Bebauung und Emissionsstärke der Stadt. Eine nicht unerhebliche Rolle kommen urbanen Blauflächen, also Flüssen, Teichen und Seen in der Stadt zu. Diese haben in den Sommermonaten laut einer Metaanalyse von Völker et al. (2013) einen temperatursenkenden Einfluss von bis zu 2,5K.

Unter der voranschreitenden Urbanisierung und der Nachverdichtung der Städte kommt es durch urbane Hitzeinseln zu einem wachsenden Gesundheitsrisiko. Während das Phänomen in allen Städten vorkommt, unabhängig von deren Größe und Lage, zeigt sich in nordeuropäischen Städten eine höhere gesundheitliche Vulnerabilität gegenüber Hitze als in den bereits an Hitze angepassten Städten des südlichen Europas (Ward et al. 2016). *Abb. 4.1-2* zeigt das mindestens einmal jährliche Auftreten von 14-tägigen Hitzeperioden von über 30°C am Beispiel einiger deutscher Großstädte. Dabei zeigt sich eine deutliche Zunahme dieser Ereignisse seit den 1980er Jahren (DWD 2015).

Der Stand der Forschung zu den Folgen des Klimawandels in ländlichen Regionen ist im Vergleich zu städtischen Regionen spärlich. Kleine und mittlere Kommunen sowie ländliche Regionen sind eindeutig unterrepräsentiert (Nagorny-Koring 2018, S. 58; Bulkeley 2010). Nagorny-Koring (2018) stellt heraus, dass gerade in Deutschland, einem Land, in welchem 98 Prozent der Kommunen Einwohnerzahlen von unter 50.000 haben, diese systematisch übersehen werden.

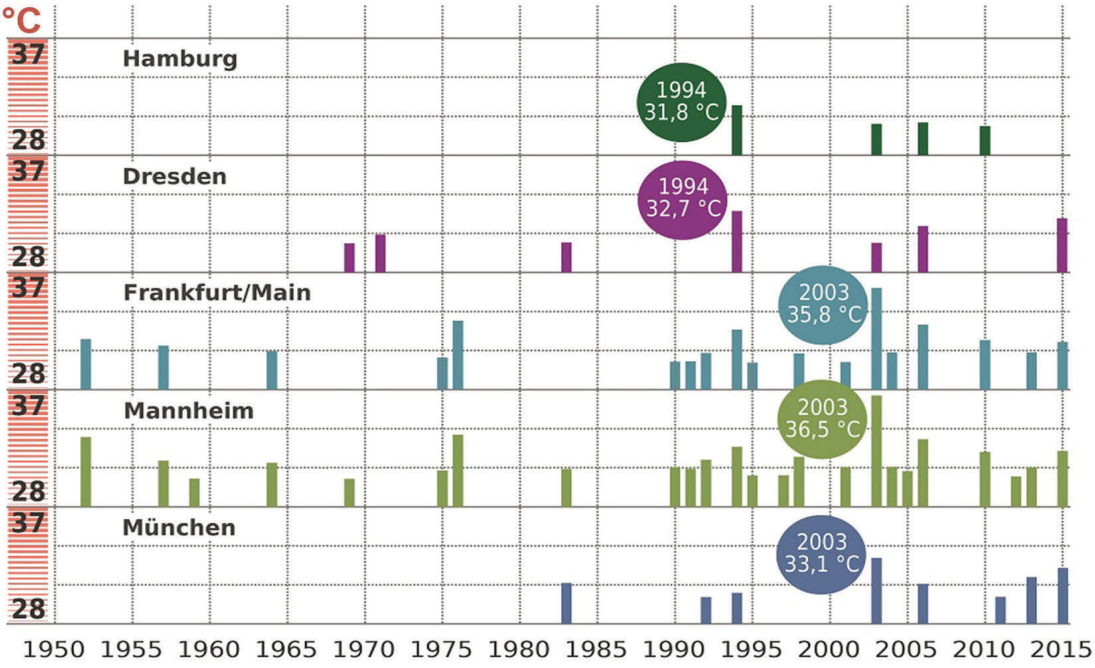


Abb. 4.1-2: *Hitzewellen in einigen deutschen Großstädten (DWD 2015).*

Stadtgrün und Stadtblau bieten Kühlungspotenzial für Städte

Stadtgrün bezeichnet alle Grünräume in der Stadt. Dabei handelt es sich sowohl um punktuelle Freiräume, wie private Gärten, Parks und Schrebergärten, lineare Freiräume wie Alleen als auch großflächige Freiräume, wie Waldflächen. Stadtblau bezeichnet alle Oberflächengewässer einer Stadt inklusive ihrer Uferbereiche sowie Wasserbecken und Springbrunnen (Classen & Kistemann 2017). Beide haben durch ihre Ökosystemleistungen einen positiven Einfluss auf die menschliche Gesundheit (Kowarik et al. 2016). Sie filtern Schadstoffe, reduzieren Lärm und bilden eine positive Geräuschlandschaft. Auch steigern sie das physische und psychische Wohlbefinden (Völker & Kistemann 2015) und senken die Sterblichkeit, da sie Anreize zur körperlichen Aktivität setzen (Hornberg et al. 2016).

Sowohl Stadtgrün als auch Stadtblau spielen im städtischen Klima eine wichtige Rolle. Grünflächen sind im Schnitt 0,94°C kühler als die umgebenden urbanen Flächen (Bowler et al. 2010) und Gewässer liegen mit einem Kühlungspotenzial von 2,5K sogar deutlich darüber (Völker et al. 2013).

Einfluss von Hitze auf die menschliche Gesundheit

Deutliche Veränderungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit wirken sich negativ auf die menschliche Gesundheit aus, sowohl auf die Morbidität (Krankheitshäufigkeit) als auch auf die Mortalität (Sterblichkeit). Beide steigen proportional zu einer Senkung oder Erhöhung der Temperaturen abweichend von der Optimaltemperatur. Sowohl kalte als auch heiße Temperaturen beeinflussen die Gesundheit des Menschen nachteilig. Ein besonders hohes Risiko, an gesundheitlichen Folgen einer thermischen Belastung zu leiden, haben ältere Menschen, Kleinkinder und Säuglinge, Erkrankte, Obdachlose und Menschen, die regelmäßig draußen arbeiten. Auch die Einnahme bestimmter Medikamente (u.a. Diuretika, Anticholinergika und Neuroleptika) erhöht das Risiko (Bouchama et al. 2007).

Mortalität durch Hitze

Eine Analyse der Mortalität in Zusammenhang mit Hitzewellen in Deutschland zeigte, dass durchschnittlich pro Jahr etwa 2.700 Todesfälle durch Hitzewellen auftreten. Die Studie bezog jedoch den Displacement-Effekt, das ist eine verringerte Sterblichkeit nach einem Hitzeereignis, nicht mit ein (Zacharias & Koppe 2015). Es zeigt sich, dass die optimale Durchschnittstemperatur zwischen 14°C und 17°C liegt und jedes weitere Grad die Sterblichkeit um 2,45% erhöht (Zacharias & Koppe 2015).

Abb. 4.1-3 zeigt die relative Mortalität im Verlauf einer Hitzewelle in Deutschland. Es wird deutlich, dass die Mortalität mit Verlauf der Hitzewelle zunimmt und ihr Maximum am dritten Tag der Hitzewelle erreicht.

Die Erhöhung der Sterblichkeit ist auf die thermische Belastung zurückzuführen, die eine anhaltende Hitzewelle mit sich bringt. Die Todesfälle sind dabei nicht immer direkt auf die Hitze zurückzuführen, beispielsweise durch Hitzeerschöpfung oder Hitzeschlag, sondern teilweise auch auf die Verschlimmerung vorbestehender Grunderkrankungen (z.B. Herz-Kreislauf-Erkrankungen). Ein Review wissenschaftlicher Untersuchungen über den Zusammenhang der Umgebungstemperatur mit der Mortalität der Bevölkerung konnte zeigen, dass Alter, Geschlecht sowie Zugehörigkeit zu einer ethnischen Minderheit Risikofaktoren sind. Den untersuchten Studien zufolge verstarben Personen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit mit einem Alter von über 65 Jahren, einem niedrigeren

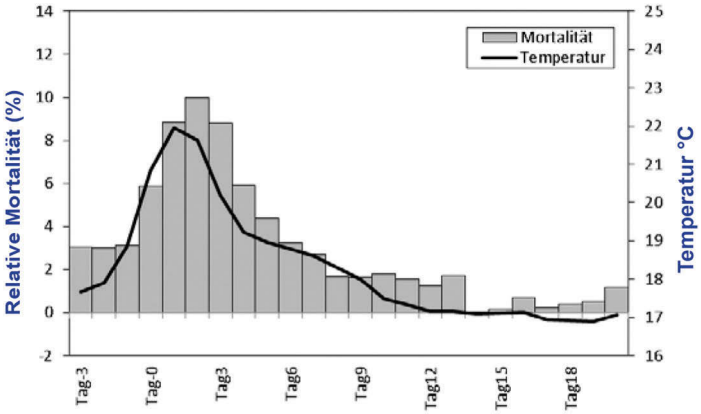


Abb. 4.1-3: *Prozentuale Veränderung der Mortalität während Hitzewellen im Zeitraum 1971-2000, Tag 0 entspricht dem ersten Tag der Hitzewelle (Zacharias & Koppe 2015, S. 73).*

Einkommen, in höheren Stockwerken lebend und wenn sie männlich waren. Auch Menschen, die allein lebten, bettlägerig waren, ihre Wohnung selten verließen oder unter psychischen Erkrankungen oder Herzerkrankungen litten, verstarben häufiger (Basu & Samet 2002). Je näher der Wohnort dem Stadtzentrum war, desto stärker waren sie betroffen. Protektive Faktoren sind der Zugang zu einer Klimaanlage sowohl zuhause als auch außerhalb, Zugang zu Mobilität, eine mit Bäumen oder Sträuchern bepflanzte Umgebung, die Fähigkeit, sich selbst zu versorgen, körperliche Aktivität und zusätzliche Getränke (Basu & Samet 2002). Bei hitzeinduzierter Sterblichkeit muss auch immer der Aspekt des vorgezogenen Versterbens („harvesting") einbezogen werden (Kovats & Hajat 2008). Es muss davon ausgegangen werden, dass zahlreiche Hochaltrige, die während einer Hitzeperiode sterben, in relativ naher Zukunft an anderen Erkrankungen oder Einflüssen verstorben wären. Zudem kann es in Folge des Klimawandels zu einer Verschiebung von Kälte-bedingter Sterblichkeit zu hitzebedingter Sterblichkeit kommen.

Eine Studie aus Berlin, die die hitzebedingte Sterblichkeit untersuchte, zeigt, dass es in den Jahren 2001 bis 2010 zu einer deutlichen Übersterblichkeit (Exzessmortalität) durch Hitzeereignisse gekommen ist. Die Wissenschaftler gehen von einer Zahl von jährlich etwa 1.600 Todesfällen aus. Dies entspricht 5% aller Todesfälle in Berlin (Scherer et al. 2013). Eine weitere Studie, die die Mortalität während Hitzewellen zwischen 1990 und 2006 in Berlin und Brandenburg untersuchte, kommt zu dem Schluss, dass zwar auch die ländlichen Gebiete eine höhere Sterblichkeit zu verzeichnen haben, die höchste Sterblichkeit jedoch in den dicht bebauten innerstädtischen Gebieten stattfand (Gabriel & Endlicher 2011). Kontrastierend zeigt eine amerikanische Untersuchung zur Hitzevulnerabilität in Ohio, dass dort die relative Sterblichkeit in ländlichen im Vergleich zu urbanen Gebieten leicht erhöht war. Die Forscher schließen daraus, dass Bewohner einer Stadt nicht per se stärker durch Hitze gefährdet sind (Sheridan & Dolney 2003).

Morbidität durch Hitze

Eine längere Exposition gegenüber erhöhter Lufttemperatur kann zu zahlreichen hitzebedingten Erkrankungen, wie Hitzekrämpfen, Hitzeohnmacht, Hitzschlag oder Sonnenstich führen. Die hitzeassoziierte Morbidität wird in den letzten Jahren zunehmend erfasst und ausgewertet. Die Auswertung eines Monitoringsystems (IVENA) aller Rettungseinsätze in Frankfurt a.M. für die Monate Juni-August der Jahre 2014-2018 zeigte, dass während Hitzewellen (hier: Tagesmaximaltemperatur ≥32°C an fünf aufeinander folgenden Tagen) die höchsten Tagesmaximal- und Tagesmittelwerte für Krankenhauseinweisungen und hitzeassoziierte Morbidität verzeichnet wurden (Steul et al. 2019). In einer US-amerikanischen Untersuchung zeigte sich eine erhöhte Morbidität in urbanen und ländlichen Gebieten. Einflussfaktoren waren sozioökonomische und demographische Faktoren (Hess et al. 2014).

Zur Vermeidung hitzebedingter Mortalität und Morbidität spielen auch die Risikowahrnehmung, das Wissen über präventive Maßnahmen und die davon beeinflusste tatsächliche Anpassung des Verhaltens eine große Rolle. Studien, die sich mit diesen sehr effektiven Faktoren beschäftigen, stammen überwiegend aus Australien, den USA und Großbritannien. Häufig zeigt sich, dass die Mitglieder vulnerabler Gruppen sich selbst nicht als gefährdet einstufen (Abrahamson et al. 2008; Wolf et al. 2010). Anpassungsmaßnahmen

Was ist ein Hitzeaktionsplan?

Die Weltgesundheitsorganisation hat bereits 2008 koordinierte Aktivitäten zur Prävention von negativen Auswirkungen von Hitze auf die menschliche Gesundheit im Rahmen von Hitzeaktionsplänen empfohlen (WHO 2008). Das Ziel dieser Pläne ist es, durch verhaltens- und verhältnispräventive Maßnahmen Morbidität und Mortalität durch Hitzewellen vorzubeugen (Mücke et al. 2013). Die acht Kernelemente der WHO sind zentrale Koordinierung und interdisziplinäre Zusammenarbeit, Nutzung eines Hitzewarnsystems, Information und Kommunikation, Reduzierung von Hitze in Innenräumen, besondere Beachtung von Risikogruppen, Vorbereitung der Gesundheits- und Sozialräume, langfristige Stadtplanung und weitsichtiges Bauwesen sowie das Monitoring und die Evaluation der Maßnahmen (Straff & Mücke 2017). Der zentralen Koordinierungsstelle kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie auf Landesebene, z.B. als Landesgesundheitsbehörde, oder auf der kommunalen Ebene, z.B. als Kreisgesundheitsbehörde, die Kommunikation und Vernetzung zwischen den beteiligten Akteuren steuert. Die Umsetzung der Maßnahmen ist in vier Zeithorizonten vorgesehen: Während akuter Hitzeperioden z.B. durch Reduzierung von Hitze in Innenräumen, während des Sommers z.B. durch die Ansprache vulnerabler Gruppen sowie vorbereitend vor dem Sommer und schließlich durch langfristige Planungen z.B. durch Beachtung des Klimawandels in Städtebau und Raumplanung (*Abb. 4.1-4*).

sind häufig technischer Natur, wie z.B. die Verwendung von Klimaanlagen oder Ventilatoren (Loughnan et al. 2015). Das Aufsuchen kühler Räume, das vermehrte Trinken und weitere leicht umsetzbare Maßnahmen, werden relativ wenig angewendet.

Hitzeaktionspläne zur Anpassung an extreme Hitze Die Weltgesundheitsorganisation empfahl bereits 2008 die Erstellung von Hitzeaktionsplänen, um die Bevölkerung insbesondere in stark urbanisierten Regionen zu schützen (WHO 2008). Die Empfehlungen wurden sowohl auf europäischer Ebene als auch national aufgegriffen (EU 2013; Mücke & Straff 2018). Das politische Rahmenprogramm der „Deutschen Anpassung an den Klimawandel/DAS" beinhaltet ebenfalls unter anderem das Themenfeld der menschlichen Gesundheit.

In Deutschland ist das Thema Hitzeaktionsplan zunehmend auch auf der kommunalpolitischen Agenda angekommen. In Köln beschäftigt sich aktuell ein vom Bundesumweltministerium gefördertes Projekt mit der Erstellung eines solchen Plans (Stadt Köln 2019). Das Projekt »Hitzeaktionsplan für Menschen im Alter für die Stadt Köln«, realisiert durch eine Kooperation von von Gesundheitsgeographen des Universitätsklinikums Bonn und Mitarbeiter der Kommunalverwaltung (Umweltamt und Gesundheitsamt der Stadt Köln) orientiert sich dabei an den Empfehlungen zur Umsetzung von Hitzeaktionsplänen der WHO und des Umweltbundesamtes (siehe *Abb. 4.1-4*). Ziel des Projekts sind die Erfassung der hitzebezogenen Einstellungen und Verhaltensweisen der Bevölkerung über 65 Jahren, der Aufbau eines Kommunikations- und Handlungsnetzwerks der zuständigen Akteure aus den Bereichen Umwelt, Gesundheit, Soziales sowie Stadtplanung und -entwicklung und die Etablierung eines Hitzeaktionsplans.

Fazit

Die Zunahme von Hitzewellen in Europa erhöht das Risiko erheblicher gesundheitlicher Schäden. Neben der Reduktion von klimaschädlichen Emissionen und weiteren Klimaschutzmaßnahmen spielt die Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen, z.B. in Form von Hitzeaktionsplänen in städtischen und ländlichen Regionen, eine wichtige Rolle. Einzelne Großstädte fungieren aktuell als Leuchtturmprojekte. Auf Grund der höheren Bevölkerungsdichte in Großtädten und der dichteren Bebauung ist das Risiko hitzebedingter Folgen für die menschliche Gesundheit dort größer als in ländlichen Gebieten. Dennoch sollten Forschung und Handlungsempfehlungen den ländlichen Raum nicht systematisch übersehen. Das Nachfolgen weiterer, auch kleiner und mittlerer Kommunen ist deshalb mit Blick auf die Klimaprognosen unumgänglich.

Literatur

ABRAHAMSON V., J. WOLF, I. LORENZONI, B. FENN, S. KOVATS, P. WILKINSON et al. (2008): Perceptions of heatwave risks to health: Interview-based study of older people in London and Norwich, UK. In: Journal of public health (Oxford, England) 31 (1), S. 119-126. DOI: 10.1093/pubmed/fdn102.

BALCHIN W. G. V. & N. PYE (1947): A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. In: Q.J Royal Met. Soc. 73 (317-318), S. 297-323. DOI: 10.1002/qj.49707331706.

BASU R. & J. M. SAMET (2002): Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality. A Review of the Epidemiologic Evidence. In: Epidemiologic Reviews 24 (2), S. 190-202. DOI: 10.1093/epirev/mxf007.

BOUCHAMA A., M. DEHBI, G. MOHAMED, F. MATTHIES, M. SHOUKRI & B. MENNE (2007): Prognostic factors in heat wave related deaths. A meta-analysis. In: Archives of internal medicine 167 (20),

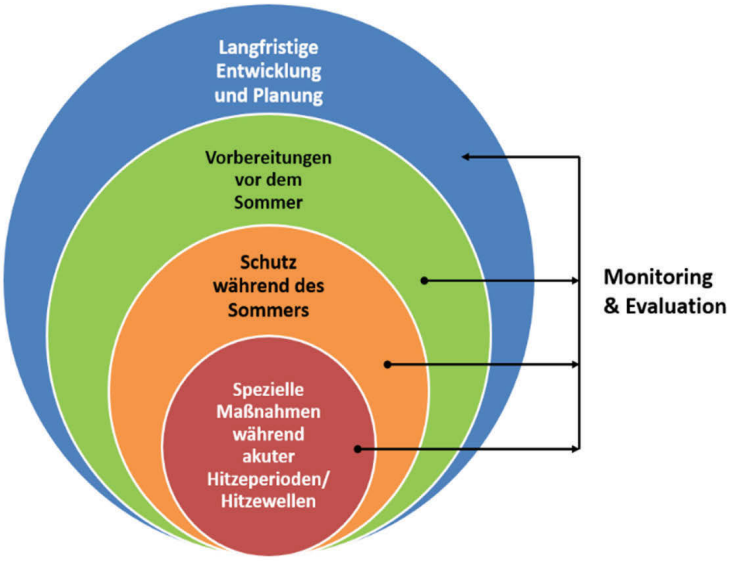


Abb. 4.1-4: *Schematische Darstellung der für die Umsetzung der Kernelemente eines Hitzeaktionsplans von der WHO vorgesehenen Zeithorizonte (Mücke & Straff 2018).*

S. 2170-2176. DOI: 10.1001/archinte.167.20.ira70009.
BOWLER D. E., L. BUYUNG-ALI, T. M. KNIGHT & A. S. PULLIN (2010): Urban greening to cool towns and cities. A systematic review of the empirical evidence. In: Landscape and Urban Planning 97 (3), S. 147-155. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.
BULKELEY H. (2010): Cities and the Governing of Climate Change. In: Annu. Rev. Environ. Resour. 35 (1), S. 229-253. DOI: 10.1146/annurev-environ-072809-101747.
CLAßEN T. & T. KISTEMANN (2017): Urbane Grünräume und Gewässer. Ressourcen einer integrierten, gesundheitsfördernden Stadtentwicklung der Zukunft. In: Geograpische Rundschau 69 (5), S. 38-43.
DWD (Deutscher Wetterdienst) (Hrsg.) (2015): Erste klimatologische Einschätzung der Hitzewelle im Juli 2015. *https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/_functions/aktuellemeldungen/downloads/150702_hitzewelle_juli_2015_erste_einschaetzung.pdf?__blob=publicationFile&v=2* (Abgerufen 10.10.2019).
DWD (Deutscher Wetterdienst) (Hrsg.) (2019): Hitzewelle. *https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=624852*, (Abgerufen 23.10.2019).
EU (Europäische Union) (Hrsg.) (2013): Eine EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschluss der Regionen vom 16. April 2013.
GABRIEL K. M. A. & W. R. ENDLICHER (2011): Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. In: Environmental pollution (Barking, Essex : 1987) 159 (8-9), S. 2044-2050. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.01.016.
HESS J. J., S. SAHA & G. LUBER (2014): Summertime acute heat illness in U.S. emergency departments from 2006 through 2010: analysis of a nationally representative sample. In: Environmental health perspectives 122 (11), S. 1209-1215. DOI: 10.1289/ehp.1306796.
HORNBERG C., R. BEYER, T. CLAßEN, T. HERBST, M. HOFMANN, J. HONOLD et al. (2016): Stadtnatur fördert die Gesundheit (Kap. 4). In: Kowarik I., R. Bartz & M. Brenck (Hrsg.): Ökosystemleistungen in der Stadt. Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. Leipzig, Naturkapital Deutschland-TEEB DE.
HUPFER P. & W. KUTTLER (Hrsg.) (2005): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner.
IPCC (eds.) (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland.
KALKSTEIN L. S. (1993): Direct impacts in cities. In: The Lancet 342 (8884), S. 1397-1399. DOI: 10.1016/0140-6736(93)92757-K.
KOVATS R. S. & S. HAJAT (2008): Heat stress and public health. A critical review. In: Annual review of public health 29, S. 41-55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.
KOWARIK I., R. BARTZ & M. BRENCK (Hrsg.) (2016): Ökosystemleistungen in der Stadt. Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. Leipzig, Leipzig: Naturkapital Deutschland-TEEB DE.
KUTTLER W. (2004): Stadtklima. In: UWSF - Z Umweltchem Ökotox 16 (3), S. 187-199. DOI: 10.1065/uwsf2004.03.078.
KUTTLER W., A. MIETHKE, D. DÜTEMEYER & A.-B. BARLAG (2015): Das Klima von Essen. Hohenwarsleben: Westarp Wiss.
LOUGHNAN M., M. CARROLL & N. J. TAPPER (2015): The relationship between housing and heat wave resilience in older people. In: International journal of biometeorology 59 (9), S. 1291-1298. DOI: 10.1007/s00484-014-0939-9.
MÜCKE H.-G. & W. STRAFF (2018): Bund/Länder-Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeempfehlungen zum Schutz der menschlichen Gesundheit - die Umsetzung auf der kommunalen Ebene kann beginnen. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu) (Klimaschutz und Gesundheit) (Hrsg.).
MÜCKE H.-G., W. STRAFF, M. FABER, M. HAFTENBERGER, D. LAUßMANN, C. SCHEIDT-NAVE & K. STARK (2013): Klimawandel und Gesundheit. In: Allgemeiner Rahmen zu Handlungsempfehlungen für Behörden und weitere Akteure in Deutschland. Rober Koch-Institut und Umweltbundesamt. Berlin (Hrsg).
NAGORNY-KORING N. (2018): Kommunen im Klimawandel. Dissertation. Transcript GbR.
OKE T. R. (1973): City size and the urban heat island. In: Atmospheric Environment (1967) 7 (8), S. 769-779. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6.
ROBINSON P. J. (2001): On the Definition of a Heat Wave. In: J. Appl. Meteor. 40 (4), S. 762-775. DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<0762:OTDOAH>2.0.CO;2.
RÖSLER C. (2012): Klimaschutz und Stadtplanung. In: BÖHME C., C. KLIEMKE, B. REIMANN & W. SÜß (Hrsgs.): Handbuch Stadtplanung und Gesundheit. Verlag Hans Huber, S. 165-173.
SCHERER D., U. FEHRENBACH, T. LAKES, S. LAUF, F. MEIER & C. SCHUSTER (2013): Quantification of heat-Stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. In: Die Erde 144 (3-4), S. 238-259.
SHERIDAN S. C. & T. J. DOLNEY (2003): Heat, mortality, and level of urbanization: measuring vulnerability across Ohio, USA. In: Clim. Res. 24, S. 255–265. DOI: 10.3354/cr024255.
STADT KÖLN (Hrsg.) (2019): Hitzeaktionsplan für Menschen im Alter. *https://www.stadt-koeln.de/artikel/67953/index.html*, (abgerufen 28.10.2019).
STEUL K., H.-G. JUNG & U. HEUDORF (2019): Hitzeassoziierte Morbidität. Surveillance in Echtzeit mittels rettungsdienstlicher Daten aus dem Interdisziplinären Versorgungsnachweis (IVENA). In: Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz. DOI: 10.1007/s00103-019-02938-6.
STEWART I. D. & T. R. OKE (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. In: Bull. Amer. Meteor. Soc. 93 (12), S. 1879-1900. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
STRAFF W. & H.-G. MÜCKE (2017): Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. In: Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 60 (6), S. 662-672. DOI: 10.1007/s00103-017-2554-5.
UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (2018): Gesundheitsrisiken durch Hitze. *https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#textpart-1* (01.11.2019).
VÖLKER S., H. BAUMEISTER, T. CLAßEN, C. HORNBERG & T. KISTEMANN (2013): Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space – a health geographic perspective. In: Erdkunde 67 (04), S. 355-371. DOI: 10.3112/erdkunde.2013.04.05.
VÖLKER S. & T. KISTEMANN (2015): Developing the urban blue. Comparative health responses to blue and green urban open spaces in Germany. In: Health & place 35, S. 196-205. DOI: 10.1016/j.healthplace.2014.10.015.
WARD K., S. LAUF, B. KLEINSCHMIT & W. ENDLICHER (2016): Heat waves and urban heat islands in Europe. A review of relevant drivers. In: The Science of the total environment 569-570, S. 527-539. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.119.
WOLF J., W. N. ADGER & I. LORENZONI (2010): Heat Waves and Cold Spells. An Analysis of Policy Response and Perceptions of Vulnerable Populations in the UK. In: Environ Plan A 42 (11), S. 2721-2734. DOI: 10.1068/a42503.
WHO (World Health Organization) (ed.) (2008): Heat Health Action Plans. Kopenhagen.
ZACHARIAS S. & C. KOPPE (2015): Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Kontakt:
Juliane Kemen
juliane.kemen@ukbonn.de
Prof. Dr. Thomas Kistemann
thomas.kistemann@ukbonn.de
Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit
Universitätsklinikum Bonn

Kemen J. & T. Kistemann (2019): Der Einfluss urbaner Hitze auf die menschliche Gesundheit. In: Lozán, J. L. S.-W. Breckle, H. Graßl, W. Kuttler & A. Matzerakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. 113-119. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.16.

4.2 Städtische Luftqualität im Klimawandel

Markus Quante, Volker Matthias & Martin Ramacher

Die Luftqualität in Städten wird bei fortschreitendem Klimawandel auch überwiegend von den anthropogenen Primäremissionen abhängen. Eine Vielzahl von Städten in der Welt leidet unter stark verschmutzter Luft, wofür vornehmlich Emissionen aus den Sektoren Verkehr, Industrie und Hausbrand verantwortlich sind. Der Klimawandel wird die Konzentration der Schadstoffe verändern. Besonders zu erwähnen ist das bodennahe Ozon, das bei ansteigenden Temperaturen deutlich höhere Konzentrationen erreichen kann. Bei den Feinstaubkonzentrationen ist die Lage nicht ganz klar. In Regionen mit erhöhter Niederschlagsaktivität ist mit einem Anstieg der nassen Deposition zu rechnen. Erweiterte grüne Infrastrukturen können zu zusätzliche BVOC-Emissionen und zu Einschränkungen der Ventilation in Städten führen.

***Urban air quality under Climate Change:** The air quality will under future climate change also predominantly depend on primary anthropogenic emissions. Many cities in the world suffer from severe air pollution caused mainly by emissions from the sectors traffic, industry and residential heating. Among the air pollutants it will be especially ground-level ozone for which higher concentrations are expected due to increased temperatures. For particulate matter the overall effect of climate change is more complex to disentangle. In regions with a projected increase in precipitation amounts an increase in wet deposition is expected. Adaptation measures by employing urban trees should be aware of possible additional BVOC emissions and negative effects on ventilation.*

Die Belastung durch Luftschadstoffe ist eines der wichtigsten urbanen Umweltprobleme weltweit und in den sich schnell industrialisierenden Regionen eines der drängendsten Probleme. Mit einer in die Millionen gehenden Zahl von vorzeitigen Todesfällen ist die Luftverschmutzung das größte Umweltgesundheitsrisiko überhaupt (Lelieveld et al. 2015, WBGU 2016, Landrigan et al. 2018). Hier sind vor allem Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen zu nennen (z.B. Beelen et al. 2014, Eisenman et al. 2019; s. Kap. 4.3 Augustin - in diesem Band). Neben den Menschen in den betroffenen Gebieten werden auch Ökosysteme und Ernteerträge in der Umgebung von Luftschadstoffen beeinflusst (z.B. Wang et al. 2017).

Eine interessante und wichtige Fragestellung in diesem Kontext ist möglicher Einfluss des Klimawandels auf die globale Luftbelastung im Allgemeinen (Fiore et al. 2012) und auf diejenige in städtischen Ballungsgebieten und ihrer unmittelbaren Umgebung im Besonderen (z.B. Borrego et al. 2018). Städte sind Kernbereiche menschlicher Aktivitäten, mit denen häufig Emissionen von Gasen und Partikeln (Aerosole) in die Atmosphäre verbunden sind. Diese Emissionen beeinträchtigen mitunter die lokale Luftqualität enorm, sie können zudem auch zum deutlichen Anstieg der Konzentrationen von Schadgasen in der Umgebung von Städten beitragen. Anthropogene Emissionen von Schadgasen stammen in den Städten überwiegend aus den Sektoren Verkehr, Industrie und Raumheizung (Matthias et al. 2018). In Hafenstädten kommen noch Schiffsemissionen dazu, die durchaus einen substanziellen Beitrag zur Gesamtbelastung beitragen können (z.B. Karl et al. 2019). Bei den emittierten Stoffen handelt es sich insbesondere um die Gase Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid (CO) und flüchtige organische Verbindungen (VOCs). Unter bestimmten Voraussetzungen (siehe unten) können NO_2 und VOCs die Konzentration des Sekundärschadstoffs Ozon (O_3) bedeutend erhöhen.

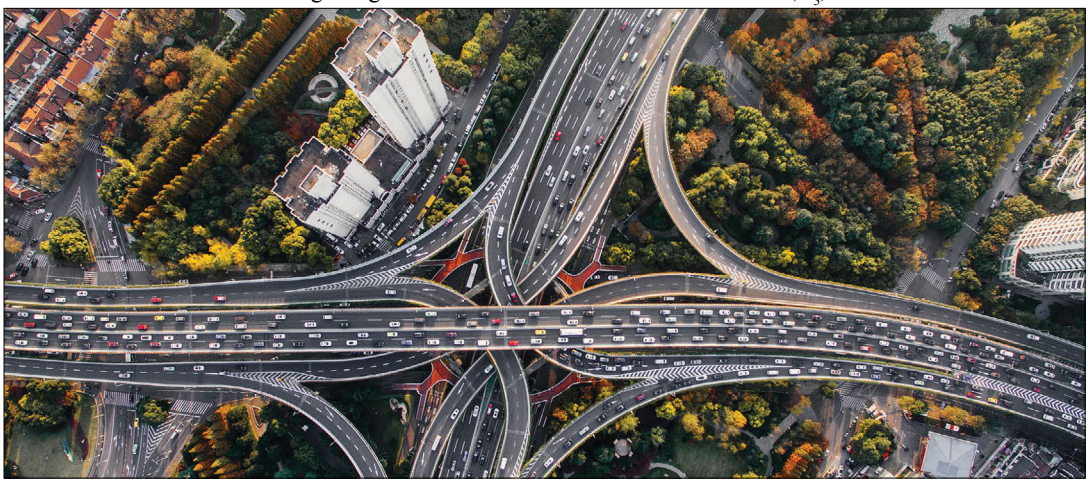


***Abb. 4.2-1:** Der intensive Verkehr in einer Megastadt am Beispiel Shanghai (China). Foto: Denys Nevozhai, Public Domain.*

Bei den Partikeln, die eine vielfältige chemische Zusammensetzung haben können, betrachtet man die summierten Massen vieler einzelner Teilchen und spricht dementsprechend von Particulate Matter (PM). Da die gesundheitliche Bedeutung stark von der Größe der Partikel abhängt, werden diese in Größenklassen aufgeteilt und es wird von PM_{10} (Größe der Partikel < 10 µm), $PM_{2.5}$ (Größe der Partikel < 2,5 µm) oder ultrafeinen Partikeln (Größe der Partikel < 0,1 µm) gesprochen. Je kleiner die Partikel sind, umso tiefer können sie in den menschlichen Körper eindringen. Während Teilchen größer als 2,5 µm in den oberen Atemorganen abgefangen werden, können kleinere Teilchen bis tief in die Lunge und Bronchien oder sogar in den Blutkreislauf eindringen. Für die partikulären Luftbelastungen hat sich in den letzten Jahren auch die Bezeichnung Feinstaub etabliert. Es gibt noch eine Vielzahl von Substanzen, die in den Städten emittiert werden, aber hinsichtlich ihrer gesundheitlichen Wirkung und erhöhten Konzentrationen stehen Stickstoffdioxid, Ozon und Feinstaub besonders im Fokus – so auch hier (siehe dazu Kap. 4.4 Hertie - in diesem Band). Viele als Gase emittierte Stoffe werden im Nachlauf durch chemische Reaktionen (Photolyse, Oxidation) zu Partikeln, den sogenannten *Sekundären Aerosolen.*

Die Beiträge der Sektoren zu den städtischen Emissionen der jeweiligen Substanzen kann für verschiedene Städte äußerst unterschiedlich ausfallen. Beispielhaft seien hier für die Hafenstadt Hamburg in *Abb. 4.2-2* die relativen Anteile der wesentlichen Sektoren zu NO_x und $PM_{2.5}$ Emissionen gezeigt. Ein bedeutender Anteil des Verkehrssektors an den Gesamtemissionen für diese Größen ist fast allen Städten gemein.

Während sich das Problem extremer Luftverschmutzung in die schnell wachsenden Metropolen in den aufstrebenden Regionen der Welt verlagert hat, verzeichnen viele Städte in den USA und Europa sinkende Konzentrationen der meisten Schadstoffe (eine Ausnahme bilden hier oft noch die Stickoxide). Gleichwohl werden auch hier die lokal gültigen Grenzwerte oder die von der WHO vorgeschlagenen Orientierungswerte für Stickoxide oder Feinstaub überschritten. So wurde in Deutschland im Jahr 2017 der europaweit geltende Grenzwert von 40 Mikrogramm NO_2 pro Kubikmeter Luft im Jahresmittel in 65 Städten überschritten (UBA 2018).

Emissionsänderungen wie auch Änderungen in meteorologischen Parametern haben einen Einfluss auf die sich einstellenden Konzentrationen der Schadstoffe. Eine Veränderung der Emissionssituation kann durch technische Entwicklungen, sozioökonomisch bedingte Verhaltensänderungen oder gesetzliche Vorgaben bewirkt werden. Zu erwähnen bleibt, dass die sich einstellenden Schadstoffkonzentrationen in der Stadtluft oftmals nicht ausschließlich von den in der Stadt lokalisierten Emissionen abhängen. Sie werden auch durch die aus der Region in die Stadtatmosphäre eingetragen Substanzen beeinflusst. Veränderungen in den meteorologischen Gegebenheiten sind durch den fortschreitenden Klimawandel zu erwarten. Mögliche klimawandelbedingte Veränderungen von Temperatur und anderen Größen können wiederum auf die anthropogenen und natürlichen Emissionen zurückwirken.

Dieser Beitrag kann weder umfassendes Review sein, noch soll eine Vielzahl von Einzelstudien besprochen werden. Es existieren relativ wenige auf die Luftqualität in Städten konzentrierte Arbeiten, die sich auf ein mögliches zukünftiges Klima beziehen und dabei entsprechende Emissionsprognosen berücksichtigen. Häufiger sind Studien zur regionalen Luftqualität unter Klimawandelbedingungen zu finden. Ziel ist es hier, in den weiteren

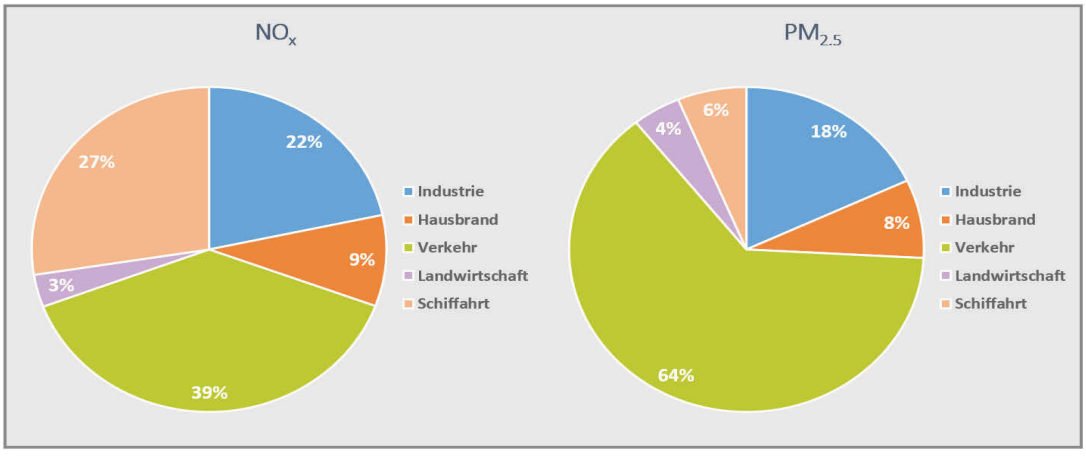


Abb. 4.2-2: *Verteilung der Stickoxid- und Feinstaubemissionen in Hamburg (2012) auf die unterschiedlichen Emissionssektoren (Zahlenwerte aus Karl et al. 2019).*

Abschnitten auf verständliche Weise, die wesentlichen Prozesse und möglichen Entwicklungen anzusprechen und offene Forschungsfragen herauszustellen.

Veränderungen durch den Klimawandel

Da die Luftbelastung einer Region neben den Emissionen auch sehr stark von meteorologischen Bedingungen abhängt, ist ein Einfluss des Klimawandels auf die Luftqualität und damit auf die Gesundheit der Bevölkerung zu erwarten (Augustin et al. 2018). Die Auswirkungen eines sich verändernden Klimas auf die Luftqualität erfolgen unten anderem durch Veränderungen der Ventilationsgegebenheiten (durch Wind, Mischungsschichthöhe, Konvektion und Frontpassagen), der Auswaschung durch Niederschläge, der chemischen Umwandlungsraten und der natürlichen Emissionen. Insbesondere zeigt sich in Modellstudien, die als wesentliche Grundlage für die Betrachtungen des Zusammenhangs zwischen Luftqualität und Klimawandel herangezogen werden, eine deutliche Abhängigkeit der Ozonkonzentration in Gebieten mit hoher Schadstoffbelastung von der Temperatur (Weaver et al. 2009, Dawson et al. 2009, Kuttler 2011a, Fiore et al. 2012, Colette et al. 2013). Für die USA und Europa zeigen auf Beobachtungen gestützte Studien auch eine Häufung von extremer Luftbelastung (O_3 und $PM_{2.5}$) bei stagnierenden Wetterlagen, deren Zunahme mit dem fortschreitenden Klimawandel erwartet wird (Trail et al. 2013, Doherty et al. 2017). Jacob & Winners (2009) verweisen auf einen über die kommenden Dekaden zu erwartenden Anstieg der Ozonkonzentration im Sommer um 1 bis 10 ppb, der allein auf den Klimawandel zurückzuführen ist. Dabei treten die stärksten Effekte in städtischen Gebieten und während intensiver Belastungsperioden auf.

Einfluss auf Ozon

Die Bildung von troposphärischem Ozon lässt sich umfassend durch die Kopplung des Stickoxid-Zyklus und des RO_x-Zyklus beschreiben. Die wesentlichen Reaktionen und Mechanismen einschließlich der Initialisierung durch Radikale und Terminierung sind in *Abb. 4.2-3* skizziert. Die zum angeregten atomaren Sauerstoff aus der Photolyse von NO_2 alternativen Oxidantien (HO_2, RO_2) konvertieren das primär emittierte NO zu NO_2. Weitere Reaktionen steuern den NO_x Zyklus effizient und produzieren somit O_3 ohne NO_x zu verbrauchen. Der RO_x Zyklus liefert dazu HO_2 und RO_2 nach. Angetrieben wird dieser Zyklus durch OH initiierte Degradation von VOCs. In der verschmutzen Troposphäre werden die RO_2-Radikale hauptsächlich über die Photolyse von O_3, HONO und Carbonylverbindungen und der Ozonolyse von ungesättigten VOCs gebildet. Der genaue Bildungspfad und die Menge an erzeugtem O_3 hängen stark von den Konzentrationen der Vorläufersubstanzen NO_x und VOC ab (Jacob 1999). In der städtischen Grenzschicht lassen sich sowohl NO_x-limitierte wie auch VOC-limitierte Situationen finden, die die O_3-Bildung begrenzen können.

In *Abb. 4.2-4* sind die wichtigsten meteorologischen Einflüsse auf die Ozonkonzentration aufgeführt. Ein Temperaturanstieg, eine Häufung von Stagnationswetterlagen oder auch ein Anstieg des Wasserdampfgehalts der Stadtatmosphäre, sowie eine reduzierte Wolkenbedeckung können zu einem Anstieg der Ozonkonzentration in verschmutzten Regionen führen. Der Temperaturanstieg wirkt sich insbesondere positive auf die chemischen Reaktionsraten aus, die Wasserdampfkonzentration steuert die für die Ozonbildung wichtige HO_x Konzentration, weniger Wolken ermöglichen

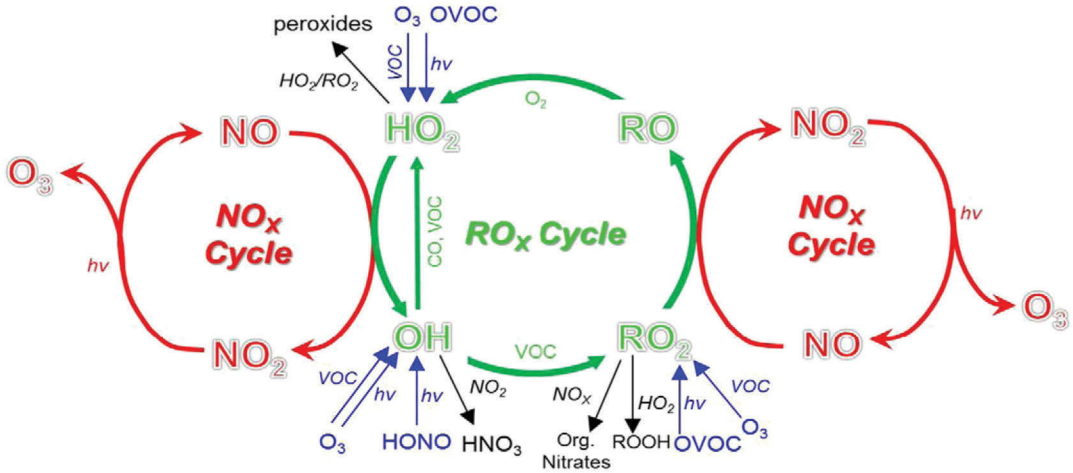


Abb. 4.2-3: *Photochemischer Ozonzyklus gekoppelt an den NOx-Zyklus (rot) und RO_x-Zyklus (grün) mit Initialisierung durch Radikale (blau) und Terminierung (schwarz). Quelle: Wang et al. (2017).*

eine erhöhte UV-Einstrahlung und damit eine stärker angetriebene Photochemie, stagnierende Wetterlagen begünstigen das Aufbauen von hohen Konzentrationen durch eine reduzierte Ventilation. Siehe hierzu den Übersichtsartikel von Doherty et al. (2017).

Einfluss auf Feinstaub

Der mögliche Einfluss des sich wandelnden Klimas auf die Feinstaubkonzentrationen ist komplex, er hängt stark von der Niederschlagshäufigkeit ab, ebenfalls spielt die Mischungsschichthöhe hier eine wichtige Rolle (*Abb. 4.2-5*). Beide Größen sind heute in Modellstudien noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Hierbei ist auch zu beachten, dass regionale klimawandelbedingte Veränderungen des Niederschlags mit Auswirkungen auf die Partikeldeposition durch Städte deutlich modifiziert werden können (z.B. Liu & Niyogi 2019, und s. Kap. 1.1 Kuttler - in diesem Band), was in vielen Studien noch nicht angemessen berücksichtigt wurde. Der letztendliche Temperatureinfluss auf die Feinstaubkonzentration lässt sich sehr schwer bestimmen, es gibt gegenläufige Effekte für unterschiedliche Komponenten des Feinstaubs, mehr dazu in Doherty et al. (2017). Ein geändertes Wind- und Niederschlagsklima kann sich verstärkend oder abschwächend auf die Resuspension von Partikeln auswirken, bei denen es sich zu einem großen Anteil um verkehrsbedingten Brems-, Reifen-, und Straßenabrieb handelt (Amato 2018).

Die Rolle von Klimaanpassungsmaßnahmen - BVOCs

Neben den Auswirkungen von allgemeinen Emissionsminderungen und dem potenziellen Einfluss der durch den Klimawandel veränderten meteorologischen Größen auf Schadstoffemissionen und -konzentrationen können auch einige Klimaanpassungsmaßnahmen die Luftqualität beeinflussen.

Generell werden Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen bei der Gebäudeheizung und im Verkehrsbereich auch direkt zur Senkung von Schadstoffemissionen und damit auch von entsprechenden Konzentrationen führen. Aber auch eine Erhöhung der Oberflächenalbedo in einer Stadt, die eine Abkühlung bewirken soll, könnte sich durch erhöhte kurzwellige Strahlungsflüsse auf die Photochemie und damit auf entsprechende Gas- und Partikelkonzentrationen auswirken, z.B. in Richtung einer Erhöhung der Ozonkonzentration.

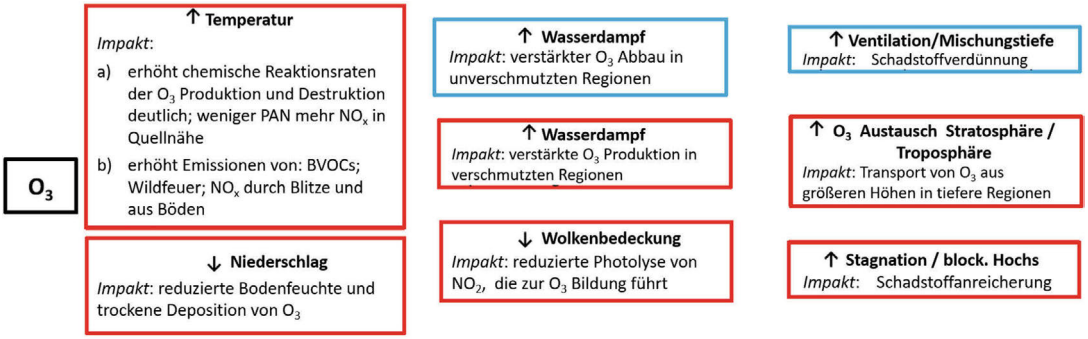


Abb. 4.2-4: *Möglicher Einfluss von meteorologischen Größen und Klimavariablen auf die Ozonkonzentration. Die Pfeile symbolisieren eine Erhöhung bzw. Verringerung der jeweiligen Variablen – rote (blaue) Rahmen der Boxen zeigen eine mit der Änderung verbundenen Erhöhung (Verringerung) der Ozonkonzentration an. Quelle: Doherty et al. (2017).*

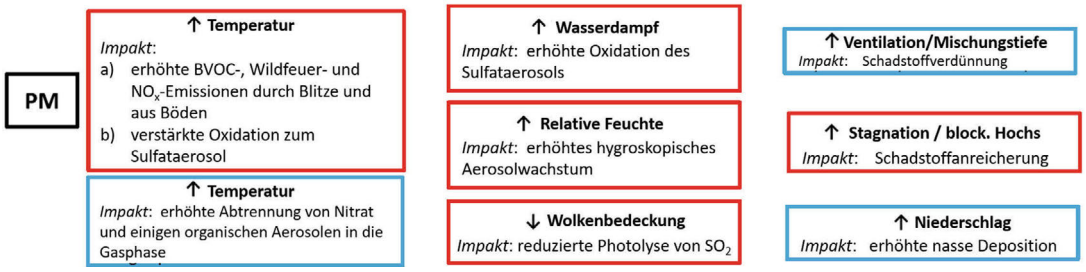


Abb. 4.2-5: *Möglicher Einfluss von meteorologischen Größen und Klimavariablen auf die Feinstaubkonzentration. Die Pfeile symbolisieren eine Erhöhung bzw. Verringerung der jeweiligen Variablen – rote (blaue) Rahmen der Boxen zeigen eine mit der Änderung verbundenen Erhöhung (Verringerung) der Feinstaubkonzentration an. Quelle: Doherty et al. (2017)*

Zur Abmilderung der städtischen Überwärmung wird auch immer wieder eine deutliche Ausweitung des Stadtgrüns (Stadtbäume, Straßenbegleitgrün, Dach- und Fassadengrün) ins Auge gefasst (*Abb. 4.2-6*). Veränderungen in der Stadtvegetation können sowohl positive wie auch negative Folgen für die Luftqualität haben. Auf der einen Seite können mehr Bäume zusätzliche Flächen (insbesondere Blatt- und Nadelflächen) für die Schadstoffdeposition bereitstellen, auf der anderen Seite behindern sie möglicherweise auch eine reinigende Ventilation insbesondere von Straßenschluchten (z.B. Salim et al. 2015). Sie werden durch Schattenbildung und eine damit verbundene Abkühlung zudem die bodennahe Luftchemie verändern (z.B. Simpson & McPherson 1998).

Pflanzen und insbesondere auch Bäume emittieren jedoch abhängig von der jeweiligen Spezies und den Umgebungsbedingungen mal mehr oder weniger Kohlenwasserstoffe, die *Biogenic Volatile Organic Compounds* (BVOCs) (Eisenman et al. 2019). Zu nennen sind hier insbesondere Emissionen von Isopren, Monoterpenen und Sesquiterpenen. BVOCs können die bodennahe Ozonkonzentration erhöhen und damit die Luftqualität negativ beeinflussen (Niinemets & Monson 2013). Allerdings ist die genaue Abschätzung der Beiträge der städtischen Vegetation zum gesamten organischen Kohlenwasserstoff und die Wechselwirkung der biogenen Emissionen mit den städtischen Schadstoffen noch Forschungsgegenstand (Eisenman et al. 2019). Auch die Effekte von Ozon auf biochemische Reaktionen und die physiologischen Bedingungen, die zu BVOC Emissionen führen, sind noch weitestgehend unbekannt und damit auch der letztendliche Effekt auf die Ozonkonzentration (Calfapietra et al. 2013). Zudem werden die BVOC-Emissionen noch von unterschiedlichen abiotischen Stressoren, die sich im Klimawandel deutlich verändern können, beeinflusst, hier sind insbesondere der Hitze- und Trockenheitsstress zu nennen, aber auch erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen haben einen Einfluss (Niinemets & Monson 2013). Pflanzenstress in Verbindung mit einem sich ändernden Klima, und hier insbesondere der Hitzestress und Trockenheitsstress, würde sich auch auf die BVOC-Emissionen auswirken. Die durch Stress eher reduzierten BVOC Emissionen würden einem generellen Anstieg der Isoprenemissionen durch einen Temperaturanstieg entgegenwirken. Eine erste Untersuchung für Hamburg mit der aktuellen Verteilung von Stadtbäumen zeigte durch Trockenstress reduzierte Emissionen für alle untersuchten BVOC-Substanzen (Feldner 2019). Mit dem Modell CityCHEM (Karl et al. 2019) berechnete Ozonkonzentrationen im derzeitigen Klima fielen unter stressreduzierten Isporenemissionen bis zu 12,5% geringer aus als im Referenzfall. *Abb. 4.2-7* skizziert die groben Wirkungspfade zwischen Stadtbäumen und der Luftqualität. Zur ersten Orientierung bezüglich des Ozonbildungspotenzials und der Trockenstressanfälligkeit von unterschiedlichen Bäumen kann eine Tabelle in Kuttler (2011b) dienen. Eine Vertiefung der Problematik und eine erweiterte Liste von Baumarten mit geringen BVOC-Emissionen kann in Grote et al. (2016), Karlik & Pittenger (2016) und Fitzky et al. (2019 gefunden werden.



Abb. 4.2-6: *Urbane Vegetation, wie sie auch zur Verbesserung eines belasteten Stadtklimas vorgesehen ist. Foto: shuttersnap on Unsplash.*

Exemplarische Kurzdarstellung neuerer Regional- und stadtauflösender Studien

Viele Städte werden in Zukunft ein anderes Klima erfahren, typischerweise ein wärmeres. Auch in den hydrologischen Komponenten des Stadtklimas, insbesondere das Niederschlagaufkommen, werden in vielen Städten Veränderungen erwartet. In einigen Studien wurde der Europäische Jahrhundertsommer 2003 als Rollenmodell für zukünftige durch den Klimawandel verschärfte Sommersituationen mit ausgeprägten Hitzewellen verwendet. Vorhandene Schadstoffstudien konzentrieren sich noch eher auf die regionale Skala als auf die Stadtskala, allerdings gibt es inzwischen erste Untersuchungen mit Chemietransportmodellen zu Städten in einem heißeren Klima. Die unten aufgeführten Studien wurden ausgewählt, um den Stand der Wissenschaft auch in der Methodik zu dokumentieren. Bei den Arbeiten zu Berlin und New York City handelt es sich um die verfügbaren komplexeren Luftbelastungsstudien für eine Großstadt während einer Hitzeperiode (als Rollenmodell für einen möglichen Klimawandeleinfluss).

Hedegaard et al. (2013) bewerten Emissionsänderungen als wesentlichen Grund für Veränderungen beim Feinstaub, für die Ozonkonzentrationen sei der Einfluss durch den Klimawandel aber ebenso bedeutsam. Nach Colette et al. (2013) sind um 2030 im Bereich der südlichen Nordseeregion leicht erhöhte Ozonkonzentrationen zu erwarten, obwohl mit einem Rückgang der Stickoxidemissionen gerechnet wurde. Der Anstieg ließe sich durch geeignete klimapolitische Maßnahmen merklich abfangen. Ozonbelastungen könnten insbesondere im Zusammenhang mit extremen Sommern Bedeutung erlangen, wie z. B. bereits für das Jahr 2003 beobachtet werden konnte (Solberg et al.2008). Für die zukünftige Partikelbelastung ergibt sich kein so klares Bild. Während Colette et al. (2013) und Hedegaard et al. (2013) im Zusammenhang mit dem regionalen Klimawandel für Nordwesteuropa eine leichte Verbesserung bei den $PM_{2.5}$-Konzentrationen erwarten, zeigen einige andere Studien ein komplexeres Bild mit Konzentrationsab- und -zunahmen auf kleineren Raumbereichen.

Hong et al. (2019) haben mit einer Kombination von Klima-, Chemietransport- (mit dem WRF-CMAQ Modellsystem) und epidemiologischen Modellen den Klimawandeleinfluss auf die zukünftige Schadstoffbelastung (Ozon, $PM_{2.5}$) in China unter einem moderaten Klimaszenario (RCP4.5) untersucht. Bei festgehaltenen Emissions- und Bevölkerungsniveaus würde die Luftqualität insbesondere in stark bevölkerten urbanen Gebieten durch den Klimawandel signifikant verschlechtert. Die Zunahme von Extremen wie Hitzewellen und anhaltenden Stagnationslagen wurde dafür als Grund ermittelt.

Die folgenden zwei Studien befassen sich mit der Ozon- und $PM_{2.5}$ Entwicklung in China (ländliche- und städtische Regionen) und arbeiten dabei auch den meteorologischen Einfluss heraus:

Wang et al. (2017) betrachten in einem Review-Artikel die Rolle von meteorologischen Einflüssen auf Schadstoffentwicklungen (Ozon und $PM_{2.5}$) in chinesischen Städten im Vergleich zu ländlichen Regionen. Große chinesische Agglomerationen (einige Millionenstädte) in den Flussdeltas (Pearl River Delta, Yangtse Delta) und Peking wurden untersucht, dabei wurden auch die Ozon-favorisierenden meteorologischen Situationen herausgearbeitet. Hohe Temperaturen, starke Einstrahlung und Schwachwindsituationen, die in Verbindung mit tropischen Zyklonen im Westpazifik und großskaligem Absinken am Rand von Tiefdrucksystemen stehen, wurden als wichtige Einflüsse für sehr hohe, die Grenzwerte deutlich übersteigende Ozonkonzentrationen identifiziert. Diese Situationen können im Klimawandel in Häufigkeit und Intensität deutlich verändert auftreten, was einen entsprechenden Einfluss darstellen würde.

Li et al. (2019) konzentrieren sich bei ihrer Untersuchung des bodennahen Ozons in China bei der Analyse von Beobachtungen auf den Einfluss von meteorologischer Variabilität auf Belastungssituationen. Ein interessantes Nebenergebnis der Studie, das auf Modelluntersuchungen (GEOS-Chem) basierte, war: deutlich sinkende $PM_{2.5}$ Konzentrationen (in China seit 2013 zu beobachten) haben über einen Einfluss auf HO_2-Radikale zu steigenden Ozonkonzentrationen geführt, eine Entwicklung, die zusätzliche Minderungsmaßnahmen erfordert. Dieser Zusammenhang macht

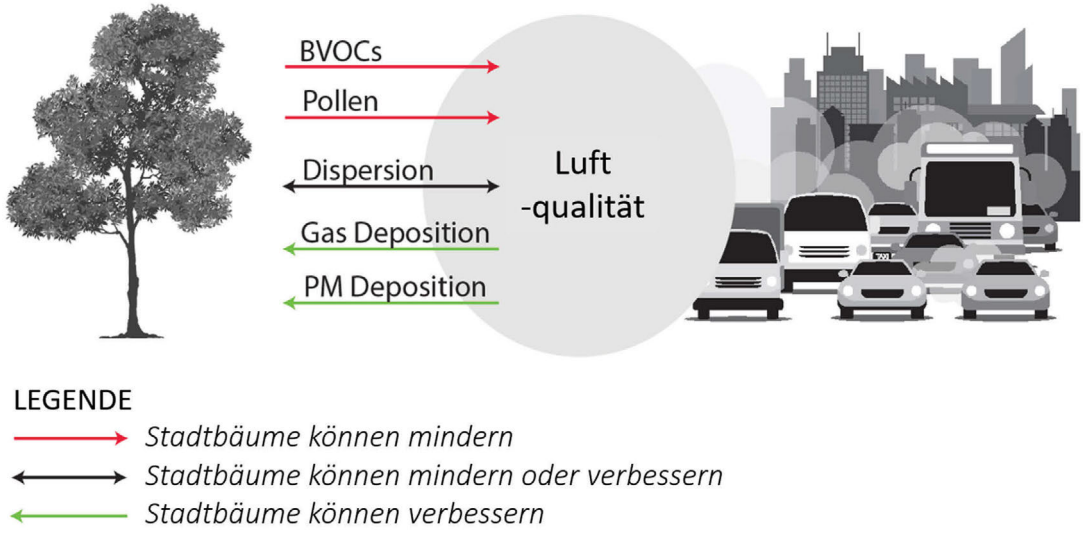


Abb. 4.2-6: *Verbindungen zwischen Stadtbäumen und der städtischen Luftqualität. Quelle: Eisenman et al. (2019).*

die Herausarbeitung des Klimawandeleinflusses auf Ozonkonzentrationen komplexer.

Es folgen zwei Studien, die sich dediziert mit der Lufqualität in einer Großstadt (Berlin bzw. New York City) während einer Hitzeperiode auseinandersetzen:

Churkina et al. (2017) vergleichen in einer Modellstudie mit WRF-Chem und MEGAN bei 1 km × 1 km Gitterauflösung die Schadstoffkonzentrationen in der Metropolregion Berlin-Brandenburg im Sommer 2006, der durch eine Hitzewelle geprägt war, mit denen für den Sommer 2014, der eher saisonal typische Temperaturen zeigte. Für den Sommer 2006 zeigte sich ein Beitrag der VOC-Emissionen des Stadtgrüns zur Ozonbildung von 6 bis 20%, während der Hitzewelle stieg dieser Beitrag auf bis zu 60% an. Das Modell-System unterschätzt noch Isoprenemissionen. Es zeigt sich, bei einer ausgeweiteten Stadtbegrünung wie sie aus Stadtklimagründen angestrebt wird sollten dringend NO_x-Emissionen (z.B. aus dem Verkehr) gesenkt werden, um die Ozonkonzentration auf ein akzeptables Niveau zu begrenzen.

Zhao et al. (2019) modellieren mit WRF-Chem und MEGAN bei 1,3 km x 1,3 km Gitterauflösung eine Episode mit Überschreitungen der Ozongrenzwerte in New York City und den umgebenden Gebieten, die durch eine ungewöhnliche Hitzewelle im Mai 2017 verursacht wurden. Die Studie deutet auf einige, von den verfügbaren Modellen noch nicht zufriedenstellend dargestellte Prozesse, neben der Grenzschichtentwicklung gehörten auch die unterschätzen Isopren-Emissionen durch MEGAN dazu. Hier zeigt sich, wie auch in den anderen erwähnten Studien, noch erheblicher Forschungsbedarf.

Zusammenfassung

Die Luftqualität in Städten wird auch bei fortschreitendem Klimawandel überwiegend von den anthropogenen Primäremissionen abhängen. Die Auswirkungen von Emissionsänderungen, bedingt durch technologische Entwicklungen, energiepolitische Entscheidungen und Veränderungen des Mobilitätsverhaltens, werden in der Regel weitestgehend für die zukünftige Belastung der Stadtluft mit Schadstoffen maßgeblich sein. Es bleibt zu erwähnen, dass sich die Primäremissionen in den Regionen der Erde unterschiedlich entwickeln. In Europa sinken diese überwiegend, in China hat sich die Feinstaubsituation seit 2013 deutlich verbessert (wodurch sich allerdings in einigen Regionen die Ozonbelastung erhöhte). In vielen »aufstrebenden« Schwellenländern wird sich die Emissionssituation in den nächsten Dekaden noch verschlechtern. Die Effektivität von anvisierten oder implementierten Luftreinhalteprogrammen ist also in der Regel auch vor dem Klimawandelhintergrund nicht in Frage zu stellen. Einige Dinge sind jedoch zu beachten.

Eine Modifikation der urbanen Luftqualität kann jedoch zusätzlich durch klimawandelbedingte regionale Veränderungen der Temperatur, der kurzwelligen Einstrahlung, der Wasserdampfkonzentration, des Niederschlags, der Wolkenbedeckung, des Windes und der Grenzschichthöhe bewirkt werden. Die in einigen Regionen zu erwartenden Extremereignisse werden hier eine besondere Rolle spielen. In den Städten können diese regionalen Veränderungen noch mal durch stadtmeteorologische Prozesse modifiziert werden. Eine zunehmende Anzahl der Extremereignisse, wie warme niederschlagsfreie Perioden mit hohen Ozon-Konzentrationen oder anhaltend sehr kalte Inversionswetterlagen im Winter mit hohen PM-Konzentrationen, ist zu erwarten. Die sich einstellenden resultierenden Effekte sind jedoch äußerst schwer zu quantifizieren und schon gar nicht leicht zu verallgemeinern, vieles hängt empfindlich von den örtlichen Gegebenheiten ab.

Aber einige allgemeine Aussagen können gemacht werden. Der Klimawandel kann insbesondere extreme Luftverschmutzungsepisoden in Städten dahingehend verschärfen, dass Bedingungen für die Bildung hoher bodennaher Ozonkonzentrationen begünstig werden (erhöhte Temperaturen, biogene Emissionen und reduzierte Ventilation). In einigen Regionen können allerdings solche Episoden auch schneller wieder durch Niederschläge gestoppt werden (eine wärmere Welt kann regional auch eine feuchtere sein). Bei der Planung von Klimaanpassungsmaßnahmen durch zusätzliches Stadtgrün, insbesondere Stadtbäume, sind die möglichen biogenen volatilen organischen Kohlenwasserstoffemissionen und die Einschränkung der Ventilation im Auge zu behalten. BVOCS können zu erhöhten Ozonkonzentrationen führen. Ein geändertes lokales Windklima wird sich auf die Wiederaufwirbelung von deponiertem Feinstaub auswirken, bei dem es sich zum große Anteil um Abrieb aus dem Verkehrssektor handelt.

Da es noch wenige dedizierte Studien zu den Einflüssen des Klimawandels auf der Stadtskala gibt, die meteorologische (Wärmeinselstruktur, Niederschlagsmodifikation) wie auch atmosphärenchemische Prozesse gleichermaßen umfassend behandeln, besteht auf diesem Feld noch erheblicher Forschungsbedarf. Städte müssen mitunter gleichzeitig die Problematiken verbunden mit meteorologischen Extremereignissen, wie einer starken Überwärmung oder Überflutungen durch Starkniederschläge und einer temporär stark erhöhten Luftbelastung vorbeugend angehen, um in Zukunft das Wohlergehen und die Gesundheit ihrer Bewohner angemessen zu schützen. Für viele Städte auf der Welt kann das eine institutionelle Herausforderung bedeuten.

Literatur

AMATO F. (ed.) 2018: Non-Exhaust Emissions - An Urban Air Quality Problem for Public Health; Impact and Mitigation Measures. Academic Press, 342 pp.

AUGUSTIN J., R. HORSTMANN, T. HOMEIER, K. JENSEN, J. KNIELING, A. C. KREFIS, M. QUANTE et al. (2018): Gesundheit (Kap. 8). In: VON STORCH H., I. MEINKE & M. CLAUSSEN (Hrsg.) Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland. Springer-Verlag. Heidelberg, 173-192.

BEELEN R., O. RAASCHOU-NIELSEN, M. STAFOGGIA, Z. J. ANDERSEN, G. WEINMAYR, B. HOFFMANNEEF et al. (2014) Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. Lancet 838(9919): 785-795.

BORREGO C., S. RAFAEL, V. RODRIGUES, A. MONTEIRO, S. SORTE, S. COELHO & M. LOPES (2018): Air quality, urban fluxes and cities resilience under climate change – A brief overview. Int. J. Environ Impacts, Vol. 1, No. 1, 14-27.

CALFAPIETRA C., S. FARES, F. MANES, A. MORANI, G. SGRIGNA & F. LORETO (2013): Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: a review. In: Environmental pollution (Barking, Essex : 1987) 183, S. 71-80. DOI: 10.1016/j.envpol. 2013.03.012.

CHURKINA G., F, KUIK, B. BONN, A. LAUER, R. GROTE, K. TOMIAK & T. M. BUTLER (2017): Effect of VOC Emissions from Vegetation on Air Quality in Berlin during a Heatwave. - Environmental Science and Technology, 51, 11, p. 6120-6130.DOI: *http://doi.org/10.1021/acs.est.6b06514.*

COLETTE A, BESSAGNET B, VAUTARD R, SZOPA S, RAO S, SCHUCHT S, KLIMONT Z, MENUT L, CLAIN G, MELEUX F, CURCI G, ROUÏL L (2013) European atmosphere in 2050, a regional air quality and climate perspective under CMIP5 scenarios. Atmos Chem Phys 13(15): 7451-7471.

DAWSON J. P., P. N. RACHERLA, B. H. LYNN, P. J. ADAMS & S. N. PANDIS (2009): Impacts of climate change on regional and urban air quality in the eastern United States: Role of meteorology, J. Geophys. Res., 114, D05308, doi:10.1029/2008JD009849.

DOHERTY R. M., M. R. HEAL & F. M. O'CONNOR (2017): 'Climate change impacts on human health over Europe through its effect on air quality', Environmental Health, vol. 16(Suppl. 1), 118. *https://doi.org/10.1186/s12940-017-0325-2.*

EISENMAN T. S., G. CHURKINA, S. P. JARIWALA, P. KUMAR et al. (2019): Urban trees, air quality, and asthma: an interdisciplinary review Landscape and Urban Planning, 187. pp. 47-59.

FELDNER J. (2019): Modelling of stress-induced biogenic volatile organic compound emission in Hamburg. Bachelorarbeit, Leuphana Universität Lüneburg, 41pp.

FIORE A. M., V. NAIK, D. V. SPRACKLEN, A. STEINER, N. UNGER, M. PRATHER, D. BERGMANN, P. J. CAMERON-SMITH et al. (2012): Global air quality and climate. Chem. Soc. Rev., 41, 6663-6683, doi:10.1039/c2cs35095e.

FITZKY A. C., H. SANDÉN, T. KARL, S. FARES, C. CALFAPIETRA, R. GROTE, A. SAUNIER & B. REWALD (2019): The Interplay Between Ozone and Urban Vegetation - BVOC Emissions, Ozone Deposition, and Tree Ecophysiology. Front. For. Glob. Change 2:50. DOI: 10.3389/FFGC.2019.00050.

GROTE R., R. SAMSON, R. ALONSO, J. H. AMORIM, P. CARIÑANOS et al. (2016): Functional traits of urban trees: Air pollution mitigation potential. Frontiers in Ecology and the Environment, 14(10), 543-550.

HEDEGAARD G. B., J. H. CHRISTENSEN & J. BRANDT (2013): The relative importance of impacts from climate change vs. emissions change on air pollution levels in the 21st century. Atmos Chem Phys 13(7):3569-3585.

HONG C., QIANG ZHANG, YANG ZHANG, STEVEN J. DAVIS, D. TONG, Y. ZHENG, Z. LIU, D. GUAN, H. E. KEBIN & H. J. SCHELLNHUBER (2019): Impacts of climate change on future air quality and human health in China. PNAS, 116 (35) 17193-17200.

KARL M., S.-E. WALKER, S. SOLBERG & M. O. P. RAMACHER (2019): The Eulerian urban dispersion model EPISODE. Part II: Extensions to the source dispersion and photochemistry for EPISODE-CityChem v1.2 and its application to the city of Hamburg, Geosci. Model Dev., 12, 3357-3399.

JACOB D. (1999): Introduction to Atmospheric Chemistry. Princeton University Press.

JACOB D. J. & D A. WINNER (2009): Effect of climate change on air quality. Atmospheric Environment 43(1): 51-63.

KARL M., S.-E. WALKER, S. SOLBERG & M. O. P. RAMACHER (2019): The Eulerian urban dispersion model EPISODE – Part 2: Extensions to the source dispersion and photochemistry for EPISODE–CityChem v1.2 and its application to the city of Hamburg. Geosci. Model Dev., 12, 3357-3399.

KARLIK J. F. & D. R. PITTENGER (2016): Biogenic hydrocarbon emissions: A consideration for large-scale planting programs. Acta Horticulturae 1108: 255-261.

KUTTLER W. (2011a): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen. Environmental Sciences Europe, 23:11.

KUTTLER W. (2011b): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 2, Maßnahmen. Environmental Sciences Europe, 23:21.

LANDRIGAN P. J., R. FULLER, N. ACOSTA, O. ADEYI, R. ARNOLD, N. (NIL) BASU, A. BALDÉ et al. (2018): The Lancet Commission on pollution and health. The Lancet, Volume 391, Issue 10119, Pages 462-512.

LELIEVELD J., J. S. EVANS, M. FNAIS, D. GIANNADAKI & A. POZZER (2015): The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. Nature, 525(7569), 367-371. doi:10.1038/nature15371.

LI K., J. DANIEL J. JACOB, H. LIAO, L. SHEN, Q. ZHANG & KELVIN H. BATES (2019): Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China. Proceedings of the National Academy of Sciences, 116, 2, 422-427.

LIU J. & D. NIYOGI (2019): Meta-analysis of urbanisation impact on rainfall modification. Scientific reports, 9:7301.

MATTHIAS V., J. A. ARNDT, A. AULINGER, J. BIESER, H. DENIER VAN DER GON, R. KRANENBURG, J. KUENEN, D. NEUMANN, G. POULIOT & M. QUANTE (2018): Modeling emissions for three-dimensional atmospheric chemistry transport models. Journal of the Air & Waste Management Association, 68:8, 763-800. doi:10.1080/10962247.2018.1424057.

NIINEMETS Ü. & R. MONSON (ed.) (2013): Biology, Controls and Models of Tree Volatile Organic Compound Emissions. Dordrecht: Springer Science+Business Media (Tree Physiology, Volume 5).

SALIM M. H., K. H. SCHLÜNZEN & D. GRAWE (2015): Including Trees in the Numerical Simulations of the Wind Flow in Urban Areas: Should We Care?, J. Wind Eng. Ind. Aerod., 144, 84-95, 2015.

SIMPSON J. R. & E. G. MCPHERSON (1998) Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. Atmos. Environ., 32, pp. 69-74.

SOLBERG S., Ø. HOV, A. SØVDE, I. S. A. ISAKSEN, P. CODDEVILLE, H. DE BACKER, C. FORSTER, Y. ORSOLINI, & K. UHSE (2008): European surface ozone in the extreme summer 2003, J. Geophys. Res., 113, D07307, doi:10.1029/2007JD009098.

TRAIL M., A. P. TSIMPIDI, P. LIU, K. TSIGARIDIS, Y. HU, A. NENES & A. G. RUSSELL (2013): Downscaling a global climate model to simulate climate change impacts on US regional and urban air quality. Geosci. Model Dev., 6, 1429-1445, doi:10.5194/gmd-6-1429-2013.

UBA (Umweltbundesamt) (2018): Finale Daten zur NO_2-Belastung 2017 verfügbar. *https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/finale-daten-zur-no2-belastung-2017-verfuegbar* (22.07.2019).

WANG T., L. XUE, P. BRIMBLECOMBE, Y. F. LAM & L. ZHANG (2017): Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effect, Sci. Total. Environ., 575:1582-1596.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. Berlin: WBGU.

WEAVER C. P., X. Z. LIANG, J. ZHU, P. J. ADAMS, P. AMAR, J. AVISE, M. CAUGHEY et al. (2009): A preliminary synthesis of modeled climate change impacts on US regional ozone concentrations, B. Am. Meteorol. Soc., 90, 1843-1863, doi:10.1175/2009bams2568.1, 2009.

ZHAO K., Y. BAO, J. HUANG, Y. WU, F. MOSHARY et al. (2019): A high-resolution modeling study of a heat wave-driven ozone exceedance event in New York City and surrounding regions. Atmospheric environment, 199, 368-379. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.10.059.

Kontakt:

Prof. Dr. Markus Quante
Dr. Volker Matthias
Martin Ramacher, MSc
Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Institut für Küstenforschung
markus.quante@hzg.de

QUANTE M., V. MATTHIAS & M. RAMACHER (2019): Städtische Luftqualität im Klimawandel. In: LOZÁN J. L. S.-W. BRECKLE, H. GRASSL, W. KUTTLER & A. MATZARAKIS (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 120-127. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.17.

4.3 Gesundheitliche Bedeutungen von Partikelbelastungen

JOBST AUGUSTIN

Verschmutzte Luft stellt weltweit das größte Umweltrisiko für die Gesundheit dar. Bezogen auf Deutschland sind es vor allem drei Luftschadstoffe, die die Gesundheit negativ beeinflussen: Feinstaub (PM), Stickstoffdioxid (NO_2) und Ozon (O_3). Luftschadstoffe treten in der Regel als Schadstoffgemisch auf und begünstigen primär das Auftreten von Atemwegs- und Herz-Kreislauferkrankungen. Zunehmend gibt es aber auch Hinweise darauf, dass Allergien, Diabetes mellitus Typ II, neurodegenerative Erkrankungen (z.B. Parkinson, Alzheimer) sowie verschiedene Einflüsse auf die Schwangerschaft (z.B. Dauer, Geburtskenngröße) im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber Luftschadstoffen stehen. Effektive Maßnahmen zur Luftreinhaltung haben einen unmittelbaren Effekt und können die Belastung der Gesundheit deutlich reduzieren.

Health relevance of air pollution: *Air pollution is the greatest environmental risk to health worldwide. In Germany, three air pollutants in particular have a negative impact on health: particulate matter (PM), nitrogen dioxide (NO_2) and ozone (O_3). Air pollutants usually occur as a mixture of pollutants. They increase the likelihood of the occurrence of respiratory and cardiovascular diseases. However, there are also indications that allergies, diabetes mellitus type II, neurodegenerative diseases (e.g. Parkinson, Alzheimer) could be related to air pollution. Also the exposure to air pollutants could influence parameters of pregnancy (e.g. duration, birth parameters). Measures controlling air pollution have an immediate effect and can reduce the negative effects on health significantly.*

Laut der Weltgesundheitsorganisation (WHO) stellt Luftverschmutzung weltweit das größte Umweltrisiko für die Gesundheit dar. Jährlich können alleine über 3 Millionen Todesfälle einer verunreinigten Außenluft zugerechnet werden (WHO 2016). Diese Zahlen verdeutlichen die Aktualität und Relevanz der Thematik, wenngleich sie, insbesondere in urbanen Räumen, nicht neu ist. Bekanntestes Beispiel ist in diesem Zusammenhang sicherlich der Dezember 1952 in London. Aufgrund extremer Luftverschmutzung über einen Zeitraum von mehreren Tagen starben tausende von Menschen an den Folgen der Luftverschmutzung. Die Ursachen dafür lagen in den hohen industrie- und verkehrsbedingten Schwefeldioxid-Emissionen (SO_2) sowie in einer ausgeprägten über mehrere Tage vorherrschenden Inversionswetterlage, die ein Luftmassenaustausch bzw. eine Frischluftzufuhr verhinderte.

Ein Luftschadstoff ist eine Beimengung der Luft mit Substanzen, die die menschliche Gesundheit gefährden können. Die Herkunft des Luftschadstoffes kann grundsätzlich unterschieden werden nach natürlichen (z.B. vulkanischer Herkunft) als auch anthropogen (vom Menschen verursacht, z.B. durch Straßenverkehr) Quellen. Mitte des letzten Jahrhunderts stand das SO_2, bedingt durch die hohen Emissionen aus Industrie und Heizungen in Haushalten hinsichtlich seiner Wirkung auf die Gesundheit in besonderem Fokus. Mittels Filter- bzw. Rauchgasentschwefelungsanlagen konnten die Emissionen deutlich gesenkt werden, so dass SO_2-Konzentrationen in Deutschland bezüglich einer gesundheitlichen Gefährdung praktisch keine Rolle mehr spielen.

Hinsichtlich ihrer gesundheitlichen Wirkung stehen jetzt die Luftschadstoffe Feinstaub (PM), Stickstoffdioxid (NO_2) und Ozon (O_3) im besonderen Fokus. Die wesentlichen Emittenten in Deutschland sind Energiewirtschaft, Straßenverkehr sowie die Industrie. Ein wesentlicher Anteil hat dabei der Verkehr, da insbesondere Feinstaub und NO_2 emittiert werden. Das bedeutet gleichzeitig auch, dass Städte aufgrund ihrer hohen Verkehrsdichte besonders stark von den Emissionen betroffen sind. Feinstaub ist ein Teil des sogenannten Schwebstaubs und wird in der Regel, aus dem englischen (Particulate Matter) abgeleitet, mit PM bezeichnet. Die Partikel werden auf Grundlage ihres aerodynamischen Durchmessers (in µm) in PM_{10} und $PM_{2,5}$ sowie Ultrafeinstaub ($PM_{0,1}$) ihrer Größe nach differenziert, wobei aufgrund des Messprinzips und der kontinuierlichen Größenverteilung keine scharfe Trennung möglich ist. Partikel mit einem Durchmesser <2,5 µm ($PM_{2,5}$) und kleiner sind damit ein Teilmenge von PM_{10}. Feinstäube (< 0,1 µm) können natürlichen (Bodenerosion, vulkanische Aschen, Bakterien Pollen, Sporen, etc.) oder anthropogenen (Verbrennungsmotoren, Reifen-, Straßen- und Bremsabrieb, Kraftwerke, Heizungen, Öfen, Landwirtschaft, etc.) Ursprungs sein, treten aber, wie Luftschadstoffe allgemein, immer als ein Partikelgemisch aus vielen Quellen auf. Zu ergänzen ist, dass Feinstäube als Träger für andere metallische oder organische Schadstoffe dienen können und ihre gesundheitsschädigende Wirkung damit nochmals erhöht werden kann. Das Ozon stammt nicht direkt aus menschlichen Quellen, sondern wird in der Atmosphäre unter dem Einfluss der UV-Strahlung auf Vorläufersubstanzen gebildet. Zu letzteren gehören vor allem NO_2 sowie Flüchtige organische Verbindungen (VOC, engl. *volatile organic compounds*) wie Kohlenwasserstoffe, deren Quellen allerdings in Teilen dem Verkehr zuzuschreiben sind.

Die Wirkung von Luftschadstoffen auf die Gesundheit bemisst sich in erster Linie nach der chemischen Zusammensetzung und ihrer Eigenschaften (z.B. Toxi-

zität), der Höhe der Emissionen sowie nach der Größe der Partikel. Letzteres ist insofern relevant, da die Aufnahme in den Körper vorwiegend über die Atemwegsorgane erfolgt und die Tiefe des Eindringens in die Organe vor allem von der Partikelgröße abhängig ist. Bedingt durch die teilweise gemeinsamen Quellen, wie dem Straßenverkehr (z.B. bei PM, O_3, NO_2), treten Luftschadstoffe üblicherweise als Gemisch auf und wirken entsprechend auch als Gemisch auf die Gesundheit. Darüber hinaus gibt es beispielsweise noch mit Ruß, ultrafeinen Partikeln oder organische Kohlenwasserstoffe weitere Partikel, die in Kombination mit dem Feinstaub und Stickstoffdioxid auftreten (Peters et al. 2019). Eine Vielzahl epidemiologischer Studien hat die Wirkung von Luftschadstoffen auf die Gesundheit untersucht. *Abb. 4.3-1* zeigt im Überblick die Wirkung Luftschadstoffe auf den Körper. Dabei ist grundsätzlich zwischen einer kurz- und einer langfristigen Wirkung zu unterscheiden.

Im Folgenden wird die Wirkung von Luftschadstoffen auf die Gesundheit beschrieben. Dabei wird der Fokus auf Erkrankungen der Atemwege sowie des Herz-Kreislaufsystem gelegt, da hierzu die Studienlage am weitesten fortgeschritten ist.

Die Wirkung von Luftschadstoffen auf die Gesundheit

Atemwegserkrankungen

Die Atemwege sind den Einflüssen von Luftschadstoffen in besonderer Weise ausgesetzt, da sie diese direkt beim Atmen aufnehmen. Die Aufnahme von Luftschadstoffen kann zu einer beeinträchtigten Lungenfunktion (Atemwegsverengungen mit der Folge eines reduzierten Lungenvolumens) und zu spezifischen Erkrankungen der Atemwege, wie beispielsweise der Chronisch Obstruktiven Lungenerkrankung (COPD), Asthma bronchiale, Bronchitis oder Pneumonie (Lungenentzündung) sowie zu vorgezogener Mortalität führen.

Hinsichtlich einer reduzierten Lungenfunktion konnten Adam et al. (2015) im Rahmen der ESCAPE (*European Study of Cohorts for Air Pollution Effects*)-Studie anhand der 7615 Teilnehme aufzeigen, dass eine erhöhte Exposition gegenüber Feinstaub am Wohnort zu nachteiligen Veränderungen bei der Lungenfunktion führen kann. Gleiche Effekte konnten die Autoren auch für NO_2 aufzeigen, wobei dies insbesondere für adipöse Personen deutlich wurde. Der Zusammenhang zwischen einer gesundheitlichen Belastung,

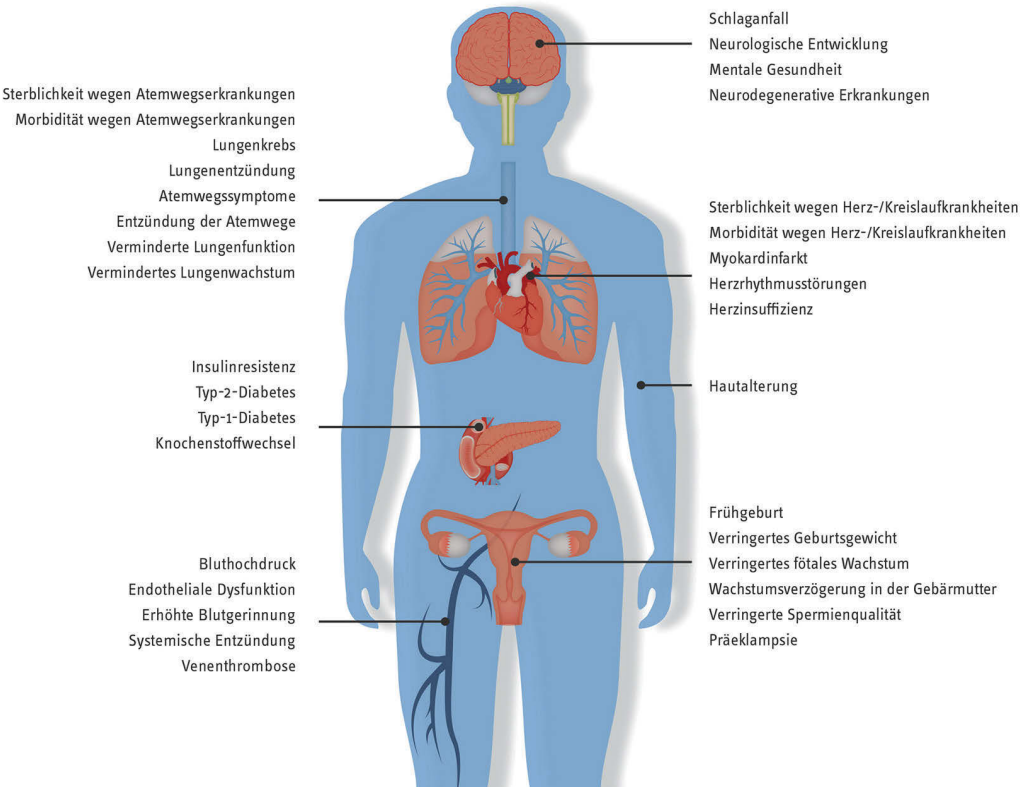


Abb. 4.3-1: *Wirkung von Luftschadstoffen auf die Gesundheit. Quelle: Peters et al. (2019).*

hier eine Reduzierung der Lungenfunktion, und der Nähe des Wohnortes zu einer stark befahrenen Straße konnten auch Bowatte et al. (2017) feststellen. Daneben haben mehrere Studien den Einfluss von Luftschadstoffen auf die Entwicklung der Lungenfunktion bei Kindern und Jugendlichen untersucht. So konnten die Ergebnisse der Children's Health Study in mehreren Regionen in Kalifornien belegen, dass eine Verminderung der Entwicklung der Lungenfunktion zwischen dem 10. und 18. Lebensjahr mit den höchsten mittleren NO_2-Expositionen gegenüber den niedrigsten in der Studienregion einhergeht (Gauderman et al. 2004). Im Rahmen der selbigen Studie konnten Avol et al. (2001) zudem zeigen, dass das Umziehen in eine Stadt mit niedriger PM_{10}-Konzentration mit einer beschleunigten Zunahme der Lungenfunktion assoziiert ist, bzw. andersherum das Umziehen in eine Stadt mit höherer PM_{10}-Konzentration mit einer verlangsamten Zunahme verbunden war. Der Vollständigkeit halber ist zur erwähnen, dass das bodennahe Ozon (0_3) ebenfalls die Lungenfunktion reduzieren und darüber hinaus auch entzündliche Reaktionen der Atemwege auslösen kann. Hinsichtlich der Wirkung des Ozons soll an dieser Stelle auf Kap. 4.4 Hertig - in diesem Band verwiesen werden.

Auch für spezifische Erkrankungen der Atemwege zeigt sich in zahlreichen Studien ein markanter Zusammenhang zwischen Luftschadstoffen und einer gesundheitsschädigenden Wirkung. So haben etwa Xu et al. (2016) einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Notfalleinlieferungen aufgrund von COPD und der Luftschadstoffkonzentration in Peking festgestellt. Eine Erhöhung von 10 µg/m³ $PM_{2,5}$ ging einher mit einem Anstieg der Notfalleinlieferungen von 1,46% am selbigen Tag. Wurden drei weitere Tage berücksichtigt, erhöhte sich die Anzahl der Einlieferungen um 3,15%.

Im Rahmen einer umfangreichen Studie haben unter anderem Pope et al. (2002) für Risikofaktoren und Todeszeitpunkt sowie Todesursache von etwa 550.000 Teilnehmern die Assoziation mit den Luftschadstoffkonzentrationen in mehr als 100 Städten untersucht. Sowohl für die Sterblichkeit an Lungenkrebs als auch für die Mortalität (gesamt und dem Herz-Kreislauf- sowie Atemwegsapparat betreffend) wurden erhöhte Risiken im Zusammenhang mit $PM_{2,5}$ deutlich. Ein Anstieg von $PM_{2,5}$ von 10 µg/m³ ging mit einem erhöhten Risiko für die Sterblichkeit an Lungenkrebs von 14% einher. In einer in 29 europäischen Städten durchgeführten Studie (*Air Pollution and Health: A European Approach*) wurde zudem auch ein linearer Zusammenhang zwischen einem Anstieg von PM_{10} von 10µg/m³ mit einer erhöhten Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen aufgezeigt (Analitis et al. 2006).

Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Neben dem Einfluss auf die Atemwege wirken sich Luftschadstoffe unter anderem auch auf das Herz-Kreislauf-System aus. Auch hierzu gibt es mittlerweile zahlreiche epidemiologische Studien, in denen die Wirkung der Luftschadstoffe auf Bluthochdruck, Herzinfarkte, Schlaganfälle und andere Erkrankungen beschrieben werden. So konnten Hoffmann et al. (2006) belegen, dass eine Langzeitexposition gegenüber Verkehrsemissionen eine erhöhte Prävalenz von Durchblutungsstörungen des Herzmuskels begünstigt. Es gibt zudem Hinweise, dass Feinstaub nicht nur bei bereits vorbestehender arteriosklerotischer Grunderkrankung das Risiko für kardiovaskuläre Ereignisse wie Herzinfarkte oder den plötzlichen Herztod erhöht, sondern sogar die Entstehung und das Fortschreiten der Arteriosklerose (Arterienverengung aufgrund von Ablagerungen) mit fördert. Dies ist insofern von Bedeutung, da Arteriosklerose nicht nur für Herzerkrankungen verantwortlich ist, sondern auch für eine Vielzahl weiterer Krankheiten, wie z. B. Schlaganfälle, Nierenschäden oder periphere Durchblutungsstörungen (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz 2010).

Bluthochdruck ist die weltweit größte singuläre Ursache für Mortalität aufgrund chronischer Krankheit (Schneider et al. 2018), da ein erhöhter Blutdruck oftmals für schwerwiegende kardiovaskulare Erkrankungen (z.B. Herzinfarkte, Schlaganfälle) verantwortlich ist. Eine zunehmende Anzahl von epidemiologischen und experimentellen Studien weist darauf hin, dass Luftschadstoffe akut zum Anstieg des Blutdrucks beitragen können (Chen et al. 2014), allerdings sind die Ergebnisse mancher Studien nicht konsistent und bedürfen noch der weiteren Untersuchung. Im Wesentlichen deuten die Studien aber darauf hin, dass eher langanhaltende bzw. kumulative Luftschadstoffexpositionen von Bedeutung sind, die zu stärkeren Blutdruckeffekten führen, also z.B. Mittelwerte über fünf bis sieben Tage (Schneider et al. 2018).

Für Herzinfarkte konnten Mustafic et al. (2012) zeigen, dass akut erhöhte Partikelkonzentrationen auch mit einem steigenden Risiko in Verbindung stehen. So konnte ein Anstieg des Herzinfarkt-Risikos um 0,6% bei einem Anstieg von PM_{10} um 10 µg/m³ ermittelt werden. Bei $PM_{2,5}$ ergab sich sogar ein Anstieg des Herzinfarkt-Risikos um 2,5% pro 10 µg/m³. Für NO_2 ist eine Zunahme der Herzinfarkte von 1,1% bei einem Anstieg um 10 µg/m³ beobachtet worden. Möglicherweise nimmt der Straßenverkehr eine bedeutende Rolle für das Auslösen von Herzinfarkten ein, denn bei einer Untersuchung an Personen, die einen Herzinfarkt überlebt hat-

ten, konnte beobachtet werden, dass der Aufenthalt im Straßenverkehr wenige Stunden vor einem Herzinfarkt ein auslösender Faktor zu sein scheint (Schneider et al. 2018). Peters et al. (2004) zeigten ein erhöhtes Risiko für die Auslösung von Herzinfarkten innerhalb einer Stunde nach der Nutzung von Verkehrsmitteln (z. B. Auto, Fahrrad, öffentliche Verkehrsmittel). Hinzuzufügen ist allerdings, dass nicht alle Studien diesen Zusammenhang belegen konnten.

In der APHEA2-Studie (*Air Pollution and Health: A European Approach 2*) wurde unter anderem die Herz-Kreislaufbedingte Mortalität aufgrund von Partikel in 29 europäischen Städten untersucht. Dabei wurde ein linearer Zusammenhang zwischen einem Anstieg von PM_{10} um 10 µg/m³ mit einer erhöhten Mortalität von 0,76% aufgrund von Herz-Kreislauf-Erkrankungen gezeigt (Analitis et al. 2006). Daneben zeigte sich ein Zusammenhang von Partikelkonzentrationen mit vermehrten Krankenhausaufnahmen aufgrund kardiovaskularer Erkrankungen von 1,3% bei 10 µg/m³ bei über 65-Jährigen (Sunyer et al. 2003).

Weitere Auswirkungen

Neben den bereits genannten Auswirkungen auf die Gesundheit stehen weiteren Erkrankungen im Zusammenhang mit der Wirkung von Luftschadstoffen. Dazu zählen Allergien, Diabetes mellitus Typ II, neurodegenerative Erkrankungen (z.B. Parkinson, Alzheimer) sowie verschiedene Einflüsse auf die Schwangerschaft (z.B. Dauer, Geburtskenngröße). Zu erwähnen ist allerdings, dass die Studienlage nicht immer ausreichend, teilweise inkonsistent, ist. Allergien können sich bei einer Exposition gegenüber Luftschadstoffen verstärken (z.B. Teng et al. 2017), allerdings handelt es sich bei Allergien um ein multifaktorielles Geschehen, das neben umweltbedingten Faktoren noch weiteren Einflüssen wie Ernährung, Hygiene, Lebensstil, Anzahl der Geschwister oder auch dem Sozialstatus unterliegt (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz 2010). Die Studienlage für den luftschadstoffassoziierten Typ II Diabetes hat sich in den letzten Jahren deutlich verbessert und einige Studien deuten mittlerweile auf einen Zusammenhang zwischen einer langfristigen Exposition gegenüber Luftschadstoffen und einer Neuerkrankung mit dem Typ II Diabetes hin (Hoffmann 2018). Eze et al. (2015) weisen jedoch auch auf die noch nicht ausreichende Studienlage bzw. Evidenz hin. Ähnlich verhält es sich auch beim Einfluss auf die Schwangerschaft und frühkindliche Entwicklung. Wenngleich auch hier noch Unsicherheiten bestehen, zeigt die Studienlage, dass der mütterliche und fetale Organismus offensichtlich durch die Luftschadstoffbelastungen negativ beeinflusst werden. Am deutlichsten ist der negative Einfluss auf das Geburtsgewicht, allerdings mit relativ geringer Effektgröße, und auf die Häufigkeit von zu geringem Geburtsgewicht, medizinisch von größerer Bedeutung, nachweisbar (Hoffmann 2018, Schulz 2018).

Vulnerable Gruppen

Die Exposition gegenüber Luftschadstoffen betrifft nicht alle Bevölkerungsgruppen gleichermaßen und ist zudem auch regional nicht gleich verteilt. So atmen Menschen, die in Afrika, Asien und im Nahen Osten leben, im Durchschnitt mehr Schadstoffe ein als in anderen Teilen der Welt und tragen daher tendenziell eine größere gesundheitliche Belastung. Aber auch auf lokaler Ebene gibt es teilweise deutliche Unterschiede in der Exposition. So unterliegen Menschen mit niedrigem Sozialstatus per se schon einem höheren Risiko für bestimmte Erkrankungen. Kommen jedoch noch negative Umwelteinflüsse hinzu, weil sie beispielsweise in Stadtteilen mit geringen Mieten, dafür aber höherer Verkehrsdichte und allgemein schlechteren Wohnverhältnissen leben, unterliegen sie nochmals einem erhöhten Krankheitsrisiko. Darüber hinaus arbeiten Menschen mit geringerem Sozialstatus häufiger in Berufen, die eine erhöhte Exposition gegenüber Stäuben, Gasen und Dämpfen mit sich bringen. Auch das Lebensalter ist von Bedeutung, da die negative Wirkung von Luftschadstoffen insbesondere bei Kindern und älteren Menschen zum Tragen kommen kann.

Insofern erfordert eine Verringerung der Gesundheitsgefährdung der Bevölkerung nicht nur eine alleinige Reduzierung der Schadstoffbelastung, sondern auch die Reduzierung von Armut und Segregation in der Bevölkerung.

Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund zahlreicher, teils großer, epidemiologischer Studien sind die Effekte von Luftschadstoffen auf die Gesundheit mittlerweile gut untersucht. Die gesundheitlichen Folgen reichen von öfters auftretenden Beschwerden und Einnahme von Medikamenten über häufigeren Krankenhauseinweisungen bzw. erhöhter Morbidität bis hin zu einer erhöhten Mortalität. Zwar sind die beobachteten Wirkungen numerisch vergleichsweise gering, ihre Bedeutung ergibt sich jedoch aus der Tatsache, dass nahezu die gesamte Bevölkerung davon betroffen ist (Böl-ke et al. 2018). Kinder, ältere Menschen sowie Menschen mit bereits vorliegenden Erkrankungen zählen zu den besonders vulnerablen Gruppen gegenüber negativen gesundheitlichen Wirkungen von Luftschadstoffen. Trotz einer mittlerweile relativ guten Studienlage lassen sich kausale Zusammenhänge von Luftschadstoffexpo-

sitionen mit der unmittelbaren Krankheitsentstehung, zumindest für die in westlichen Ländern typischerweise beobachteten Luftschadstoffexpositionen, nur bedingt belegen (Bölke et al. 2018). Grund hierfür sind unter anderem komplexe multikausale Zusammenhänge bei der Entstehung von Erkrankungen. Zudem ist es methodisch sehr anspruchsvoll, die einzelne Wirkung eines Luftschadstoffs selektiert zu bemessen, da die Luftschadstoffe in der Regel als Gemisch auftreten und entsprechend auch als ein Gemisch von einzelnen Luftschadstoffen wirken. Darüber hinaus gibt es nach wie vor eine Diskussion um die Luftschadstoffgrenzwerte und deren Messung. Zudem ist der Kenntnisstand über den Zusammenhang zwischen Expositionsdauer und krankheitsauslösenden Mechanismen, insbesondere bei Kindern, noch nicht ausreichend untersucht. Wenn gleich noch Wissenslücken bestehen machen epidemiologische Studien zur Wirkung von Luftschadstoffen auf die Gesundheit den Handlungsbedarf von Luftreinhaltemaßnahmen zum Schutze der Gesundheit deutlich. Klar ist zudem auch, dass eine konsequente Verbesserung der Luftqualität rasch positive Effekte für die Gesundheit mit sich bringen kann. In einem Positionspapier der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e.V. (Schulz et al. 2018) werden zusammenfassend die vier Forderungen formuliert, um die Luftqualität zu verbessern um deren negativen Effekte auf die Gesundheit zu reduzieren: 1) die deutliche Reduktion der Luftschadstoffbelastung, 2) die Entwicklung, Förderung und Etablierung der Kultur einer Schadstoffvermeidung, 3) Multimodale Maßnahmen zur Schadstoffvermeidung (z.B. infrastrukturelle Maßnahmen, Minderungsmaßnahmen bei spezifischen lokalen Emittenten) und 4) verstärkte Forschungsaktivitäten zur Schließung von Wissenslücken. Die eigentliche Reduktion der Luftschadstoffbelastung ist dabei nur durch ein gemeinsames, interaktives und zielorientiertes Handeln auf politischer, technologischer und individueller Ebene möglich.

Literatur

ADAM M., T. SCHIKOWSKI, A. E. CARSIN, Y. CAI et al. (2015): Adult lung function and long-term air pollution exposure. ESCAPE: a multicentre cohort study and meta-analysis. Eur Respir J 45, 38-50. doi: 10.1183/09031936.00130014.

ANALITIS A., K. KATSOUYANNI, K. DIMAKOPOULOU, E. SAMOLI et al. (2006): Short-term effects of ambient particles on cardiovascular and respiratory mortality. Epidemiology 17, 230-233. doi: 10.1097/01.ede.0000199439.57655.6b.

AVOL E. L., W. J. GAUDERMAN, S. M. TAN, S. J. LONDON & J. M. PETERS (2001): Respiratory effects of relocating to areas of differing air pollution levels. Am J Resipr Crit Care Med 164, 2067-2072. doi: 10.1164/rccm2102005.

BÖLKE G., S. KARRASCH & C. WITT (2018): Wirkorte der Luftschadstoffe. Atemwegssystem. In: SCHULZ, H., S. KARRASCH, G. BÖLKE, J. CYRYS , C. HORNBERG, R. PICKFORD , A. SCHNEIDER, C. WITT & B. HOFFMANN, Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit. Positionspapier, Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e.V., Berlin.

BOWATTE G., B. ERBAS, C. J. LODGE, L. D. KNIBBS et al. (2017): Traffic-related air pollution exposure over a 5-year period is associated with increased risk of asthma and poor lung function in middle age. Eur Respir J 50. doi: 10.1183/13993003.02357-2016.

CHEN H., R. T. BURNETT, J. C. KWONG, P. J. VILLENEUVE et al. (2014): Spatial association between ambient fine particulate matter and incident hypertension. Circulation 129, 562-569. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.113.003532.

EZE I. C., L. G. HEMKENS, H. C. BUCHER, B. HOFFMANN et al. (2015): Association between ambient air pollution and diabetes mellitus in Europe and North America: systematic review and meta-analysis. Environ Health Perspect 123, 381-389. doi: 10.1289/ehp.1307823.

GAUDERMAN W. J., E. AVOL, F. GILLILAND, H. VORA et al. (2004): The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. N Engl J Med 351, 1057-1067. doi: 10.1056/NEJMoa 040610.

HOFFMANN B., S. MOEBUS, A. STANG, E. M. BECK et al. (2006): Residence close to high traffic and prevalence of coronary heart disease. Eur Heart J 27, 2696–2702. doi: 10.1093/ eurheartj/ehl278.

HOFFMANN B (2018): Glukosetoleranz und Diabetes. In: Schulz H., S. Karrasch, G. Bölke, et al. - Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit. Positionspapier, Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e.V., Berlin.

LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VREBRAUCHERSCHUTZ (2010): Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub und Stickstoffdioxid im Zusammenhang mit der Luftreinhalteplanung.

MUSTAFIC H., P. JABRE, C. CAUSSIN, M. H. MURAD et al. (2012): Main air pollutants and myocardial infarction: a systematic review and meta-analysis. JAMA 307, 713-721. doi: 10.1001/jama. 2012.126.

PETERS A., B. HOFFMANN, B. BRUNEKREEF, N. KÜNLI et al. (2019): Die Rolle der Luftschadstoffe für die Gesundheit: Eine Expertise im Namen der Internationalen Gesellschaft für Umweltepidemiologie (ISEE) und der European Respiratory Society (ERS). Schweizerische Ärztezeitung 100, 796-799. doi: 10.4414/saez.2019.17603.

PETERS A., S. VON KLOT, M. HEIER, I. TRENTINAGLIA et al. for the Cooperative Health Research in the Region of Augsburg Study G (2004): Exposure to traffic and the onset of myocardial infarction. The New England journal of medicine 351, 1721-1730. doi: 10.1056/NEJMoa040203.

POPE C.A., BURNETT, R.T., THUN, M.J., CALLE, E.E. et al. (2002) Lung Cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. JAMA 2002; 287, 1132-1141.

SCHNEIDER A., CYRYS, J., BREITNER, S., KRAUS, U. et al. (2018) Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland. Abschlussbericht. Umweltbundesamt, 01/2018.

SCHULZ H. (2018): Schwangerschaft und in utero Exposition: mütterlicher Organismus und kindliche Entwicklung. In: Schulz H., S. Karrasch, G. Bölke, J. Cyrys et al. - Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit. Positionspapier, Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e.V., Berlin.

SCHULZ H., S. KARRASCH, G. BÖLKE, J. CYRYS et al. (2018): Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit. Positionspapier, Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e.V., Berlin.

SUNYER J., F. BALLESTER, A. L. TERTRE, R. ATKINSON et al. (2003): The association of daily sulfur dioxide air pollution levels with hospital admissions for cardiovascular diseases in Europe (The Aphea-II study). EHJ 24, 752-760. doi: 10.1016/S0195-668X(02)00808-4.

TENG B., X. ZHANG, C. YI et al. (2017): The association between ambient air pollution and allergic rhinitis: further epidemiological evidence from Changchun. Int J Environ Res Public Health 14, 226. doi: 10.3390/ijerph14030226.

WORLD HEALTH ORGANISATION (WHO) (2016): Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of disease.

XU Q., X. LI, S. WANG, C. WANG et al. (2016): Fine Particulate Air Pollution and Hospital Emergency Room Visits for Respiratory Disease in Urban Areas in Beijing, China, in 2013. PLoS One 11. doi: 10.1371/journal.pone.0153099.

Kontakt:

Dr. Jobst Augustin
Zentrum für Psychosoziale Medizin
Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
jo.augustin@uke.de

Augustin J. (2019): Gesundheitliche Bedeutung von Luftschadstoffen. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 128-132. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.18

4.4 Gesundheitsrelevante Temperatur-Ozon-Ereignisse am Beispiel Bayern

Elke Hertig

Aufgrund des hohen Zusammenhangs zwischen Lufttemperatur und Ozonbildung, der potentiell starken Veränderungen im Rahmen des Klimawandels und im Hinblick auf kombinierte Einflüsse auf die menschliche Gesundheit werden bodennahe Lufttemperaturen und Ozonkonzentrationen gemeinsam betrachtet. Als räumliches Beispiel werden verschiedene Städte in Bayern fokussiert. Während für das tägliche Temperaturmaximum (T_{max}) eine geringere Abhängigkeit von der Urbanität angenommen werden kann, zeigt sich, dass an städtischen, verkehrsnahen Stationen die mittleren sowie extremen täglich maximalen einstündigen Ozonkonzentrationen ($O_{3\,max}$) deutlich geringer ausfallen im Vergleich zu Stationen, die im städtischen oder ländlichen Hintergrund verortet sind. Vorwiegend in der »Ozonsaison« zwischen April und September besteht zwischen $O_{3\,max}$ und T_{max} ein starker Zusammenhang, der nichtlinear ausgeprägt ist. Trendanalysen für den Zeitraum 1990-2017 zeigen eine Erhöhung von Tmax, jedoch ein heterogenes Bild für $O_{3\,max}$. Im Hinblick auf Auswirkungen von Tmax und $O_{3\,max}$ auf die Gesundheit wird eine deutliche Exposition zwischen April und September sichtbar. Mit Ausnahme städtischer Verkehrsstandorte, liegt eine häufige Belastung durch $O_{3\,max}$ vor. Bei Auftreten von thermischen Belastungssituationen sind diese nahezu immer durch eine gleichzeitige Ozon-Belastungssituation gekennzeichnet, so dass es zu einer thermischen und lufthygienischen Ereigniskombination kommt, sowohl in weiten Teilen des urbanen und suburbanen Raums, als auch insbesondere in ruralen Gebieten. Aufgrund der projizierten Erhöhung der Lufttemperatur als direkte Folge des anthropogen verstärkten Treibhauseffekts, sowie der möglichen Zunahme der bodennahen Ozonkonzentrationen durch klimawandelbedingte und luftchemische Änderungen, könnte zukünftig die Exposition gegenüber gesundheitsrelevanten Temperatur-Ozon-Ereignissen weiter ansteigen.

***Temperature-ozone events relevant for human health using Bavaria as an example:** Ground-level air temperature and ozone concentrations are jointly analysed, due to the strong relationship between air temperature and ozone formation, the potentially large changes in the scope of climate change and in view of combined impacts on human health. Cities in the state of Bavaria are taken as an example. The daily temperature maximum (T_{max}) shows a weak dependence from conurbation, whereas mean and extreme daily maximum 1-hour ozone concentrations ($O_{3\,max}$) are markedly lower at urban traffic stations compared to stations which are located in an urban or rural background setting. A strong non-linear relationship exists between $O_{3\,max}$ and T_{max}, particularly in the »ozone season« from April to September. Trend analysis in the period 1990-2017 shows an increase of T_{max}, but heterogeneous results for $O_{3\,max}$. With respect to impacts of T_{max} and $O_{3\,max}$ on human health, high exposure between April and September becomes apparent. High $O_{3\,max}$ exposure occurs frequently. High thermal load is in general connected with a concurrent $O_{3\,max}$ exposure, thus usually combined events prevail. Due to the projected increases of air temperature as a direct consequence of climate change, and because of potential increases of ground-level ozone as a result of climate and air chemistry changes, the exposure to temperature-ozone events relevant for human health might further increase in the future.*

Aus der Kombination von demographischen Veränderungen (Urbanisierung, Erhöhung des Anteils älterer Bevölkerung) mit dem Klimawandel (Zunahme von Temperaturextremen) und den lokalen Effekten der Urbanisierung (urbane Überwärmung, Konzentration bestimmter Luftinhaltsstoffe) resultieren erhebliche klima- und luftbezogene Gesundheitsrisiken im städtischen Bereich.

Anhaltende Exposition gegenüber hohen Lufttemperaturen kann hitzebedingte Erkrankungen wie Hitzekrämpfe, Hitzeohnmacht, Hitzeerschöpfung und Hitzschlag hervorrufen. Epidemiologische Untersuchungen haben gezeigt, dass hohe Umgebungstemperaturen mit einer erhöhten Sterblichkeit der Bevölkerung verbunden sind. Dabei führen thermische Belastungen jedoch nicht nur zu einer Zunahme von direkt mit thermischen Extremen assoziierten Todesfällen, sondern es kommt insbesondere auch zu Todesfällen, die auf schwere Grunderkrankungen, wie kardiovaskuläre und respiratorische Erkrankungen, zurückzuführen sind (Eis et al. 2010). Neben der Lufttemperatur, spielen für das thermische Empfinden des Menschen weitere meteorologische Parameter wie Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung eine große Rolle (Jendritzki et al. 2007).

In Abhängigkeit von urbaner Struktur, Oberfläche und Bausubstanz ergeben sich ausgeprägte räumliche Variationen der urbanen Temperaturen (Oke 2006). Aufgrund der unterschiedlichen Ausprägung der einzelnen Glieder der Strahlungs- und Wärmebilanz in Städten im Vergleich zum Umland, baut sich in mitteleuropäischen Städten in der Regel vor allem in den Sommermonaten eine Wärmeinsel in den Abendstunden auf, die bis in die frühen Morgenstunden andauert (Kuttler 2010). Als entscheidende meteorologische Einflussfaktoren für das Auftreten einer ausgeprägten urbanen Überwärmung und damit einer erhöhten Wärmebelastung sind sommerliche Strahlungswetterlagen, geringer Bewölkungsgrad und geringe Windgeschwindigkeiten zu nennen (Oke 1982, Matzarakis 2001).

Neben hohen Lufttemperaturen kann die Exposition gegenüber Luftschadstoffen, wie z. B. bodennahem Ozon, erhebliche gesundheitliche Auswirkungen, vor allem in Bezug auf das kardiopulmonale System, haben. Das Ausmaß der Beschwerden wird vornehmlich über die Expositionsdauer und -stärke bestimmt. Ozon ist ein entzündlich wirkendes Reizgas, das bei erhöhten Konzentrationen Reizerscheinungen an Augen, Schleimhäuten und Atemwegen bewirkt. Neben akuten Reaktionen können langzeitliche Effekte, wie Verminderung des Selbstreinigungsmechanismus der Bronchien, Schädigung des Lungengewebes und Entstehung von Asthma, auftreten (WHO 2006). Daneben wird auch Ozon mit kardiologischen Gesundheitsgefährdungen in Verbindung gebracht. Hierzu gehören lebensbedrohliche Herzrhythmusstörungen, Herzinfarkte und Herzversagen (Eis et al. 2010). Für den europäischen Raum wird eine vorzeitige Mortalitätsrate aufgrund Ozonexposition von ca. 21.000 Fällen pro Jahr und eine Morbiditätsrate, je nach Gesundheitsfolge, zwischen 8 und 108 Millionen Personentagen pro Jahr abgeschätzt (WHO 2008).

Troposphärisches Ozon stellt dabei einen sekundären Luftschadstoff dar, der überwiegend durch photochemische Reaktionen bei solarer Einstrahlung und erhöhten Temperaturen, unter Beteiligung von Stickoxiden (NO_x), Kohlenmonoxid, Methan und flüchtigen organischen Verbindungen (*volatile organic compounds*, VOCs), gebildet wird. Damit ist das bodennahe Ozon vom stratosphärischen Ozon mit einem Maximum der Ozonkonzentration in durchschnittlich (global und jahreszeitlich gemittelt) 23-25 km Höhe zu unterscheiden, welches als Schutz des Menschen gegenüber der harten UV-Strahlung essentiell ist. In städtischen Bereichen, in denen die NO_x-Konzentrationen hoch sind, trägt Stickstoffmonoxid (NO) zum Abbau von Ozon bei. Die weitere Ozonbildung hängt von der VOC-Verfügbarkeit ab (VOC-limitiertes Regime). Die Ozonbildung im ruralen Umland wird hingegen durch den Anteil an Kohlenwasserstoffen gesteuert, vor allem der von der Vegetation emittierten biogenen VOCs (BVOCs) und die Ozonbildung ist durch die NO_x-Konzentrationen limitiert. Aufgrund höherer NO-Konzentrationen und niedrigerer BVOC- Konzentrationen, lassen sich im urbanen Raum im Allgemeinen geringere Ozonkonzentrationen feststellen im Vergleich zum Umland. Dies zeigt die Sonderstellung des Ozons im Vergleich zu anderen gesundheitsrelevanten Luftinhaltsstoffen wie Feinstaub und Stickoxide, die in der Regel erheblich höhere Konzentrationen im urbanen Raum im Vergleich zum Umland aufweisen.

Aufgrund des hohen Zusammenhangs zwischen Lufttemperatur und Ozonbildung und im Hinblick auf den potentiellen Einfluss kombinierter Effekte von Temperaturextremen und Luftschadstoffen auf die Gesundheit (Portier et al. 2010) werden im Folgenden die Stadt- Umland- Differenzierung, sowie die Charakteristika und Zusammenhänge von Ozon und Lufttemperatur gemeinsam adressiert. Darüber hinaus werden die möglichen Veränderungen der Variablen im Zuge des Klima-

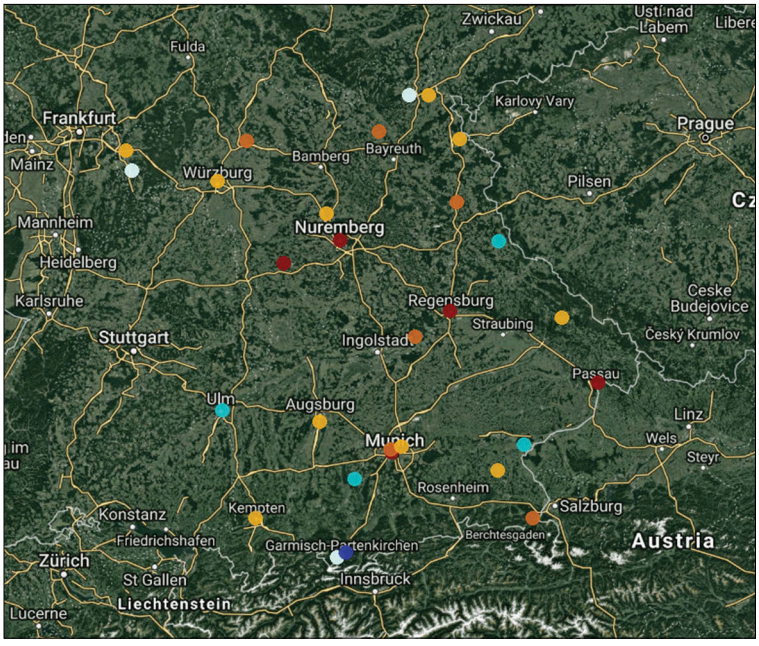


Abb. 4.4-1: *Lage der Luftmessstationen in Bayern mit Stationscharakteristik.* ***Rot:*** *städtisch Verkehr;* ***Orange:*** *städtisch Hintergrund;* ***Gelb:*** *vorstädtisch Hintergrund;* ***Hellblau:*** *ländlich stadtnah Hintergrund;* ***Türkis:*** *ländlich regional Hintergrund;* ***Dunkelblau:*** *ländlich abgelegen Hintergrund.*

wandels diskutiert. In Mitteleuropa treten die höchsten Lufttemperaturen und Ozonkonzentrationen vorwiegend in den Nachmittagsstunden im Frühjahr und im Sommer auf. Daher wird vornehmlich das Sommerhalbjahr von April bis September betrachtet. Als räumliches Beispiel werden verschiedene Städte in Bayern fokussiert.

Räumliche Differenzierung der Temperatur und des bodennahen Ozons

Die folgenden Betrachtungen basieren auf Stationspaaren von 29 Luftmessstationen des Bayerischen Landesamts für Umwelt (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019), sowie räumlich entsprechenden 29 Stationen des Deutschen Wetterdienstes (Deutscher Wetterdienst 2019), die jeweils gemeinsam mindestens 5 Jahre Daten für Ozon, Stickoxide und Lufttemperatur aufweisen. Bei den Luftmessstationen wird auch die jeweilige Stationscharakteristik berücksichtigt (*Abb. 4.4-1*). Zu beachten ist, dass die zu den Luftmessstationen zugeordneten Temperaturmessstationen nicht die gleichen lokalen Umgebungscharakteristika aufweisen. So sind die Temperaturmessstationen zwar jeweils stadtnah verortet, aber sie befinden sich in der Regel außerhalb starker Bebauung, da bei meteorologischen Messungen des Deutschen Wetterdienstes die räumliche Repräsentanz eine wichtige Rolle spielt, bei der kleinräumige, lokale Einflüsse minimiert werden sollen.

Für die Analysen werden die tägliche maximale einstündige Ozonkonzentration (im Folgenden mit $O_{3\ max}$ bezeichnet), die täglich mittleren einstündigen Stickoxidkonzentrationen (NO_{mean}/$NO_{2\text{-}mean}$), sowie das tägliche Temperaturmaximum (T_{max}) herangezogen.

Mit Bezug auf T_{max} haben Studien (z.B. Fenner et al. 2019) gezeigt, dass diese relativ gering durch die urbane Überwärmung (*urban heat island UHI*) beeinflusst wird, da die *UHI* vornehmlich ein nächtliches Phänomen darstellt und sich daher vor allem in erhöhten Werten von T_{min} und T_{mean} zeigt. Eine Untersuchung der Anzahl warmer (> 25 °C) und heißer Tage (> 30 °C) im Zeitraum 1981-2010 für Augsburg zeigt ebenfalls keine Unterschiede zwischen einer rural gelegenen Station und einer urbanen Station auf (Burgstall 2019). Daher wird im Folgenden angenommen, dass keine wesentliche Stadt-Umland-Differenzierung in Bezug auf T_{max} vorliegt und die für diese Studie herangezogenen 29 Stationszeitreihen der Lufttemperatur als ausreichend repräsentativ für die jeweiligen Stadtregionen angesehen werden können. Der über die Monate April bis September über alle 29 Stationen gemittelte Medianwert von T_{max} liegt bei 20,3 °C, das 95%-Quantil bei 28,4 °C.

Für $O_{3\ max}$ muss jedoch je nach Stationscharakteristik unterschieden werden. *Abb. 4.4-2* zeigt, dass an städtischen, verkehrsnahen Stationen (Stationen 1-5 in *Abb. 4.4-2*) die mittleren sowie extremen $O_{3\ max}$-Konzentrationen deutlich geringer ausfallen im Vergleich zu Stationen die im städtischen (Stationen 6-11), vor-

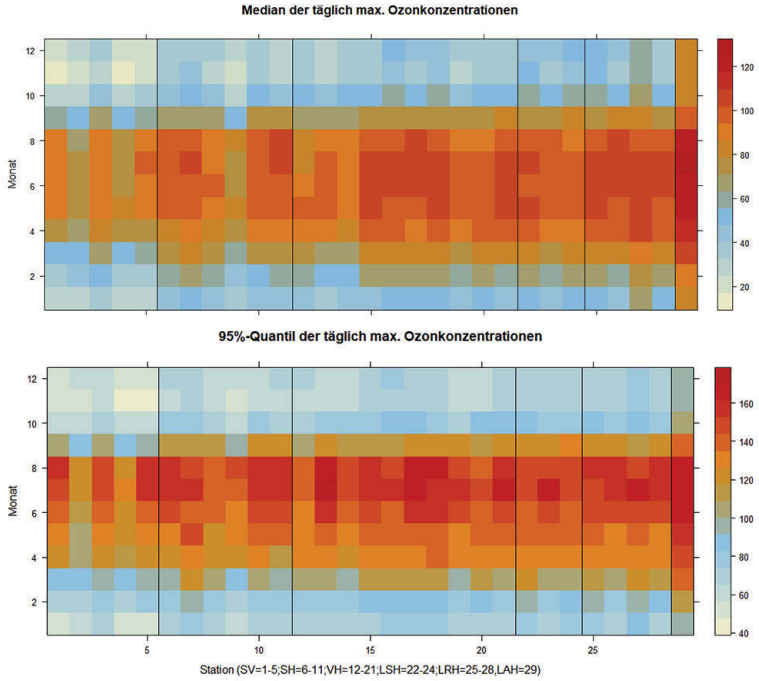


Abb. 4.4-2: *Median* ***(oben)*** *und 95%-Quantil* ***(unten)*** *der täglich maximalen 1-stündigen Ozonkonzentration. Stationen 1-5: städtisch Verkehr; Stationen 6-11: städtisch Hintergrund; Stationen 12-21: vorstädtisch Hintergrund; Stationen 22-24: ländlich stadtnah Hintergrund; Stationen 25-28: ländlich regional Hintergrund; Station 29: ländlich abgelegen Hintergrund.*

städtischen (12-21) oder ländlichen (22-29) Hintergrund verortet sind (die Station 29 »Garmisch-Partenkirchen Wankgipfel« stellt dabei eine Sondersituation dar, da sie auf 1.770 m Höhe liegt und somit generell eine höhere O_3-Konzentration aufweist. Ozon wird hier weniger durch Deposition und Titration abgebaut, welche in tieferen Lagen die dominanten Prozesse in der Grenzschicht darstellen). So liegen der Medianwert und das 95%-Quantil von $O_{3\,max}$, gemittelt über die städtischen, verkehrsnahen Stationen (Stationen 1-5) in den Monaten April bis September, bei 77 µg/m³, bzw. 124 µg/m³, für die städtischen, vorstädtischen und ländlich stadtnahen Hintergrundstationen (Stationen 6-24) jedoch im Mittel bei 92 µg/m³ bzw. 138 µg/m³ und für die Stationen des ländlich regionalen Hintergrunds (Stationen 25-28) sogar bei 98 µg/m³ und 141 µg/m³.

Wie eingangs bereits erläutert, hängt die Ozonkonzentration erheblich von der Verfügbarkeit und den Verhältnissen der Vorläufersubstanzen NO_x und (B)VOCs ab. In den Monaten April bis September beträgt der Medianwert, gemittelt über die städtischen, verkehrsnahen Stationen (Stationen 1-5), für NO_{mean} 25 µg/m³ und für $NO_{2\,mean}$ 42 µg/m³. Die Werte fallen rasch Richtung Umland ab und erreichen im städtischen Hintergrund (Stationen 6-11) noch Werte von 7 µg/m³ für NO_{mean} und 25 µg/m³ für $NO_{2\,mean}$, wohingegen im ländlich regionalen Hintergrund (Stationen 25-28) im Mittel lediglich noch Werte von 1 µg/m³ bzw. 9 µg/m³ auftreten. Die Bedeutung der räumlichen Variation der NO_x-Konzentrationen für die Ozonbildung kann unter anderem durch Korrelationsanalysen sichtbar gemacht werden und findet Ausdruck in den variablen Korrelationszusammenhängen. So nimmt der Korrelationskoeffizient von $O_{3\,max}$ mit dem ($NO_{2\,mean}$/NO_{mean})-Verhältnis von im Mittel 0,45 an den städtischen, verkehrsnahen Stationen auf Werte um Null im ländlichen Hintergrund ab, der negative Korrelationskoeffizient zwischen O_{3max} und NO_{mean} nimmt von -0,39 ebenfalls auf Werte um Null ab. Dies zeigt die Beteiligung der Stickoxide bei der Ozonbildung im städtischen Bereich auf, sowie den Prozess des Ozonabbaus bei hohen NO-Konzentrationen. Eine analoge Analyse der Bedeutung der (B)VOCs konnte aufgrund fehlender Datenverfügbarkeit nicht durchgeführt werden.

Zusammenhänge zwischen Lufttemperatur und bodennahem Ozon

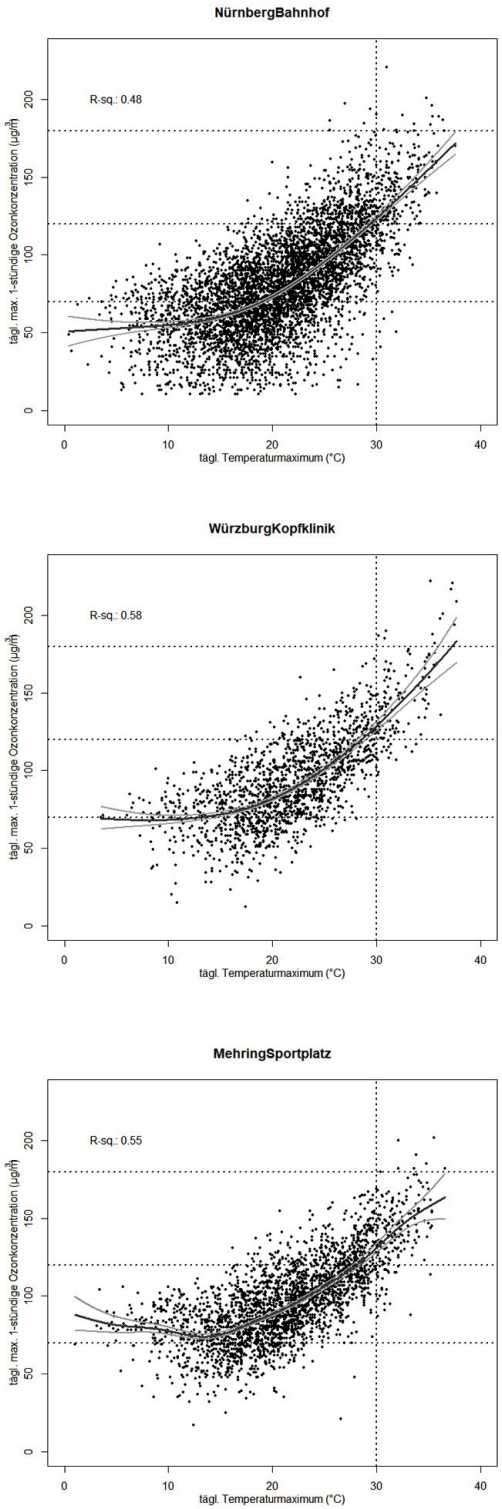
Generell besteht ein hoher Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und bodennahem Ozon. Bivariate Korrelationsanalysen zwischen $O_{3\,max}$ und T_{max} ergeben einen über alle Monate gemittelten Korrelationskoeffizienten von 0,73. Eine monatliche Differenzierung zeigt jedoch deutliche Unterschiede, mit höchsten Koeffizienten in der »Ozonsaison« zwischen April und September. An einigen Orten treten jedoch auch höhere Korrelationen in den Wintermonaten, vor allem im Dezember und Januar auf. Eine Abhängigkeit der $O_{3\,max}$-T_{max}-Korrelation von der Stationscharakteristik der Luftmessstationen lässt sich hingegen nicht feststellen (mit Ausnahme der ländlich abgelegenen Hintergrund- Station 29 auf 1.770 m Höhe, die insgesamt niedrigere Koeffizienten aufweist und bei der die positive Ozon-Temperatur-Korrelation der stärker verunreinigten Regionen nur sehr begrenzt zutrifft).

Zwischen $O_{3\,max}$ und T_{max} besteht grundsätzlich ein stark nichtlinearer Zusammenhang. *Abb. 4.4-3* zeigt hierzu als Beispiel den mittels Generalisierten Additiven Modellen (GAM, Hastie & Tibshirani 1990) berechneten Zusammenhang zwischen $O_{3\,max}$ und T_{max} im Sommerhalbjahr (April bis September) für eine städtische, verkehrsnahe Station (Nürnberg Bahnhof, Zeitraum 1980-2012), eine vorstädtische Hintergrundstation (Würzburg Kopfklinik, Zeitraum 2002-2016) und eine Station im ländlichen regionalen Hintergrund (Mehring Sportplatz, Zeitraum 2003-2017).

Trends in den Ozon- und Temperaturzeitreihen

In *Abb. 4.4-4* sind die zeitlichen Trends im Sommerhalbjahr im Zeitraum 1990-2017 für T_{max} und $O_{3\,max}$ abgebildet. Bei den Trends ist zu beachten, dass für die Mittelbildung nicht für jede Station der gleiche Zeitraum zugrunde liegt.

Während der (nicht signifikante) Trend für T_{max} knapp +0,3 K pro Dekade beträgt, liegen für $O_{3\,max}$ sowohl kein Trend (städtisch Hintergrund), ein positiver Trend (vorstädtischer Hintergrund mit 2 µg/m³ / Dekade), als auch vor allem negative Trends vor. Die negativen Trends sind statistisch signifikant (95%-Niveau) an den Stationen des städtischen Verkehrs mit -1,4 µg/m³ / Dekade und an den Stationen des ländlich regionalen Hintergrunds mit -2,4 µg/m³ / Dekade. Insgesamt zeigt sich ein sehr heterogenes Bild der $O_{3\,max}$- Entwicklung in den vergangenen Jahrzehnten, das nicht von der jeweiligen Stationscharakteristik abzuhängen scheint. Ein Vergleich mit den jeweiligen Trends für $NO_{2\,mean}$ und NO_{mean} ergibt hier ebenfalls keine systematischen Zusammenhänge (nicht dargestellt). Dies deutet auf die komplexen Bildungs- und Abbaubedingungen des bodennahen Ozons hin, bei denen neben den Stickoxiden auch die weiteren luftchemisch aktiven Substanzen (vor allem BVOCs) berücksichtigt werden müssen, sowie wichtige meteorologische Parameter wie kurzwelliger Strahlungsinput, Luftfeuchte, Grenzschichthöhe, Anströmungsrichtung und -stärke.



Gesundheitsrelevanz von Temperatur und Ozon

Zum Schutz der menschlichen Gesundheit wurde von der Europäischen Union die Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa erlassen. Diese wurde vom Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2010) mittels der Neununddreißigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV) in deutsches Recht übertragen. Der gesundheitsbezogene Zielwert liegt derzeit bei 120 µg/m³ als höchster Achtstundenmittelwert während eines Tages, wobei 25 Überschreitungen pro Jahr zugelassen sind. Darüber hinaus existiert eine Informationsschwelle von 180 µg/m³ (1-Stunden-Wert) und eine Alarmschwelle von 240 µg/m³ (1-Stunden-Wert). Als Leitwert für Untersuchungen zu gesundheitlichen Auswirkungen erhöhter Ozonkonzentration werden seitens der WHO (2008) ein Schwellenwert von 70 µg/m³ und im Rahmen des REVIHAAP-Projektes (*Review of evidence on health aspects of air pollution*, WHO 2013) ein Wert von 20 µg/m³ des maximalen täglichen Achtstundenmittels angegeben, da sich u. a. ab diesen Schwellenwerten eine statistisch signifikante Erhöhung des Mortalitätsrisikos ergibt. In einer Untersuchung von Hertig et al. (2019) wurde eine signifikante Erhöhung von Herzinfarkthäufigkeiten in Augsburg bei mittleren Werten des täglichen Ozonmaximums im Bereich zwischen 96 µg/m³ und 138 µg/m³ festgestellt. Ren et al. (2011) ermitteln in Boston (USA) eine signifikante Verschlechterung der kardiovaskulären Funktion in der warmen Jahreszeit bei hohen Ozonkonzentrationen, jedoch nicht bei erhöhten Werten von Feinstaubkonzentrationen. Generell muss aber beachtet werden, dass verschiedene Luftschadstoffe interagieren, der Einfluss von Luftschadstoffen und erhöhten Lufttemperaturen auf die menschliche Gesundheit komplex ist und viele Erkrankungen multikausale Ursachen haben, so dass einzelne Wirkmechanismen oft nur schwer zu identifizieren sind.

Mit Bezug auf die thermische Belastung gibt es entsprechende Warnmeldungen des Deutschen Wetterdienstes ab einer gefühlten Temperatur von 32 °C (die gefühlte Temperatur ist dabei ein Maß für die Unbehag-

Abb. 4.4-3: *Zusammenhänge zwischen $O_{3\ max}$ und T_{max}. Angegeben sind die Einzelwerte und der Zusammenhang einschließlich 95%- Konfidenzintervall (berechnet mittels Generalisierten Additiven Modellen), sowie die erklärte Varianz (R-sq.) des Modells. Zusätzlich eingetragen sind die gesundheitsrelevanten Schwellenwerte von $O_{3\ max}$ = 70 µg/m³ / 120 µg/m³ / 180 µg/m³ bzw. T_{max} = 30 °C.*

lichkeit und berücksichtigt hier neben der Lufttemperatur auch die Luftfeuchte). Daneben wird häufig die Definition des »heißen Tages« mit einem Schwellenwert von T_{max} > 30 °C bei Untersuchungen (z. B. Vescovi et al. 2005) herangezogen.

Zur Orientierung bezüglich der gesundheitlichen Relevanz der Ozon- und Temperaturbedingungen bei den hier untersuchten Stationen werden im Folgenden die Schwellenwerte von 70 µg/m³, 120 µg/m³ und 180 µg/m³ für $O_{3\ max}$ (man beachte, dass es sich hier bei allen um das täglich maximale Stundenmittel, nicht um das maximale Achtstundenmittel handelt) und 30 °C für T_{max} verwendet. In *Abb. 4.4-3* ist anhand der drei Beispielstationen zu sehen, dass die gesundheitsrelevanten Ozonschwellenwerte von 70 µg/m³ und auch 120 µg/m³ im Sommerhalbjahr oft überschritten werden. Darüber hinaus wird deutlich, dass in nahezu allen Fällen der T_{max}-Überschreitung von 30 °C auch immer die $O_{3\ max}$-Schwellenwerte überschritten werden. *Tab. 4.4-1* gibt einen Überblick über die prozentualen Häufigkeiten der Schwellenwertüberschreitungen, gruppiert nach Stationen mit gleicher Stationscharakteristik (die Station 29 wird aufgrund ihres Sondercharakters hier nicht berücksichtigt). Wie zu erwarten, zeigt sich für die Häufigkeit von heißen Tagen nur ein geringer Unterschied zwischen den Stationen, da hier keine Stadt-Umland-Differenzierung vorliegt. Mit Bezug auf gesundheitsrelevante Ozon-Tage wird eine hohe Häufigkeit außerhalb städtischer Verkehrsstandorte deutlich. Bereits im städtischen Hintergrund kommt es zu Überschreitungen des 70 µg/m³-Schwellenwertes an nahezu drei Viertel aller Sommertage, der 120 µg/m³- Schwellenwert wird noch an etwa 15% der Tage überschritten. Extreme Ozon-Tage mit Werten > 180 µg/m³ treten an allen Hintergrundstandorten noch an 0,3% - 0,4% aller Tage auf.

Insgesamt wird eine deutliche Exposition im Sommerhalbjahr zwischen April und September sichtbar. Mit Ausnahme städtischer Verkehrsstandorte, liegt eine

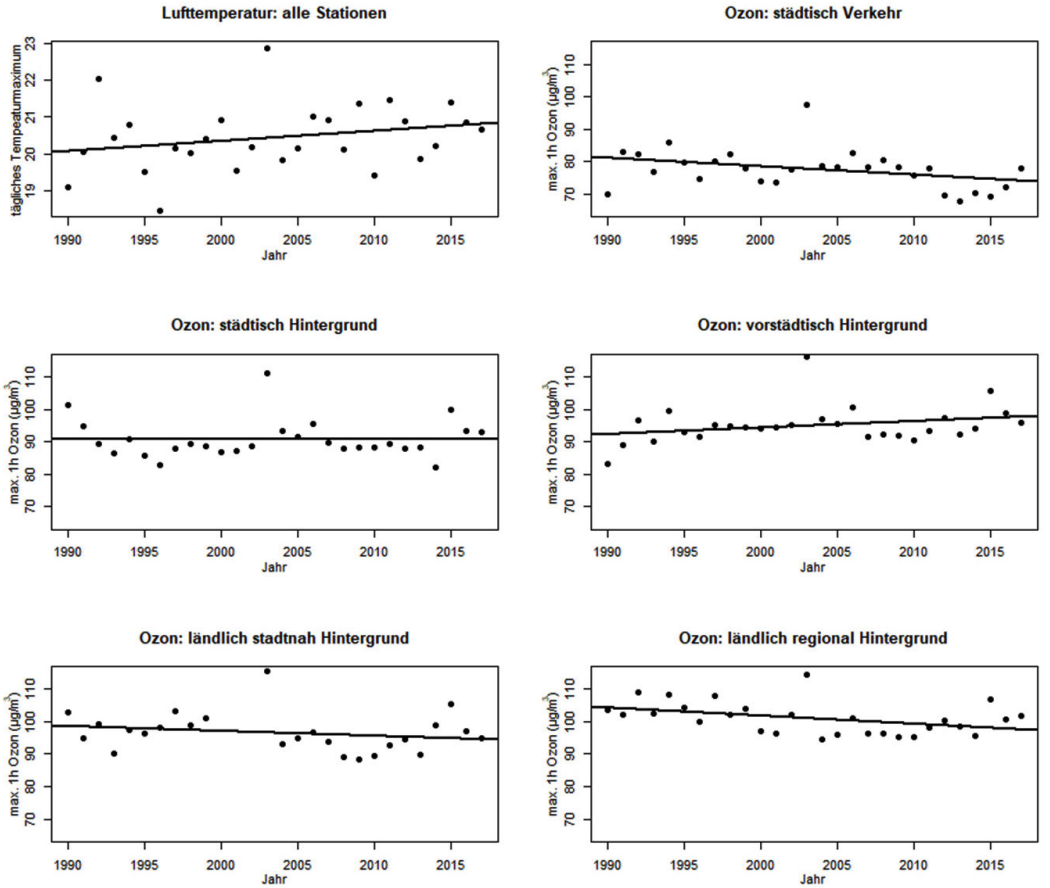


Abb. 4.4-4: *Trends für T_{max} über alle Stationen und für $O_{3\ max}$ gruppiert nach Stationscharakteristik im Sommerhalbjahr (April-September) im Zeitraum 1990-2017.*

Tab. 4.4-1: *Prozentuale Häufigkeit der Überschreitung der Schwellenwerte $O_{3\ max}$ >70 µg/m³/ 120 µg/m³ / 180 µg/m³ und T_{max} >30°C in den Monaten April bis September. Angegeben sind Mittelwerte über die Stationen mit jeweils gleicher Stationscharakteristik.*

Stationscharakteristik	Anzahl Stationen	T_{max} > 30°C	$O_{3\ max}$ > 70 µg/m³	$O_{3\ max}$ > 120 µg/m³	$O_{3\ max}$ > 180 µg/m³
Städtisch Verkehr	5	5,3	51,5	7,7	0,1
Städtisch Hintergrund	6	5,1	73,0	14,4	0,3
Vorstädtisch Hintergrund	10	4,3	74,0	15,7	0,4
Ländlich stadtnah Hintergrund	3	3,1	78,0	16,2	0,3
Ländlich regional Hintergrund	4	4,1	83,8	18,8	0,4

häufige Belastung durch bodennahes Ozon vor. Bei Auftreten von thermischen Belastungssituationen sind diese nahezu immer durch eine gleichzeitige Ozon- Belastungssituation gekennzeichnet, so dass es zu einer thermischen und lufthygienischen Ereigniskombination kommt. Von diesen kombinierten Ereignissen sind sowohl weite Teile des urbanen und suburbanen Raums, als auch insbesondere rurale Gebiete betroffen.

Entwicklung von Temperatur- Ozon-Ereignissen unter dem Klimawandel und durch Luftreinhaltemaßnahmen

In den letzten Dekaden kann eine Erhöhung des täglichen Temperaturmaximums von ca. +0,3 K pro Dekade festgestellt werden. Im Rahmen des fortschreitenden Klimawandels wird bis Ende des 21. Jahrhunderts eine Erhöhung der mittleren Lufttemperatur zwischen ca. 2 K (Frühjahr) bis ca. 4 K (Sommer, Herbst) für den süddeutschen Raum mittels Regionaler Klimamodelle unter RCP 8.5 Szenarioannahmen abgeschätzt (Jacob et al. 2014). Diese Erhöhung geht sicherlich mit einem Anstieg auch der Temperaturmaxima einher.

Der Klimawandel beeinflusst ebenfalls die Ozonbildung. So kann der Klimawandel über Veränderungen der synoptischen Verhältnisse und der chemischen Umgebungsbedingungen die bodennahen Ozonkonzentrationen erhöhen (sogenannte »*climate change penalty*«, Wu et al. 2008). Für den süddeutschen Raum wird dabei eine signifikante Erhöhung der mittleren Ozonkonzentrationen in der Größenordnung von ca. 2 bis 4 µg/m³ in den Sommermonaten ab Mitte des 21. Jahrhunderts projiziert (Colette et al. 2015).

Neben dem Klimawandel haben auch Änderungen in der Konzentration und Zusammensetzung der Vorläufersubstanzen Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen. Bekanntermaßen kommt Stickoxiden in diesem Kontext eine bedeutende Rolle zu. Ein Ziel derzeitiger Luftreinhaltemaßnahmen liegt in der Senkung der Stickoxidemissionen. Dies geht jedoch nicht zwingend auch mit einer Reduktion der Ozonbildung einher. So zeigen sich in einer globalen Trendanalyse von Sicard et al. (2018) an den meisten urbanen Stationen positive Ozontrends, während an den ruralen Stationen negative Trends überwiegen. Die erhöhten Hintergrundkonzentrationen in Städten werden auf einen geringeren Abbau von Ozon durch NO zurückgeführt, aufgrund der Verringerung der lokalen NO_x-Emissionen. Diese Entwicklung wird jedoch, zumindest rezent, nicht von den bayerischen Stationen nachvollzogen.

Zusammenfassend kann aufgrund der projizierten Erhöhung der Lufttemperatur als direkte Folge des anthropogen verstärkten Treibhauseffekts, sowie der möglichen Zunahme der bodennahen Ozonkonzentrationen durch klimawandelbedingte und luftchemische Änderungen, zukünftig die Exposition gegenüber gesundheitsrelevanten Temperatur- Ozon- Ereignissen ansteigen.

Mit Bezug auf Anpassungsstrategien, die sich derzeit vor allem auf die thermische Belastungskomponente beziehen, sollten daher auch luftchemische Aspekte Berücksichtigung finden. So ist zum Beispiel bei Anpassungsmaßnahmen in Form des Einsatzes von städtischem Grün nicht nur eine größtmögliche Kühlwirkung zu erzielen, sondern unter anderem auch eine effektive Deposition von Luftschadstoffen und geringe Emission biogener flüchtiger organischer Verbindungen. Im Rahmen von Luftreinhaltemaßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass sich das NO_2/NO-Verhältnis nicht ungünstig im Hinblick auf eine verstärkte Ozonbildung verschiebt. Insgesamt ist bei lokalen bis regionalen Maßnahmen zu berücksichtigen, dass das bodennahe Ozon komplexen Aufbau- und

Abbauprozessen unterliegt und damit eine starke regionale Variation aufweisen kann. Damit wird es vonnöten sein, räumlich hochaufgelöste Informationen, die die wesentlichen Prozesse der Ozonbildung und des -abbaus berücksichtigen, zur Verfügung zu stellen.

Literatur

BAYERISCHEN LANDESAMT FÜR UMWELT (2019): Messwertarchiv. *https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/messwertarchiv/index.htm* (07.05.2019).

BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 10. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2244) geändert worden ist. *http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_39/gesamt.pdf* (abgerufen am 09.09.2019).

BURGSTALL A. (2019): Representing the Urban Heat Island Effect in Future Climates. Masterarbeit am Institut für Geographie der Universität Augsburg. 91 S.

COLETTE A., C. ANDERSSON, A. BAKLANOV, B. BESSAGNET et al. (2015): Is the ozone climate penalty robust in Europe? Environmental Research Letters, 10(8), 084015.

DEUTSCHER WETTERDIENST (2019): Climate Data Center. *https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html* (07.05.2019).

EIS D., D. HELM, D. LAUSSMANN & K. STARK (2010): Klimawandel und Gesundheit – Ein Sachstandsbericht. Hrsg.: Robert Koch-Institut, Berlin.

FENNER D., A. HOLTMANN, A. KRUG & D. SCHERER (2019): Heat waves in Berlin and Potsdam, Germany–Long-term trends and comparison of heat wave definitions from 1893 to 2017. International Journal of Climatology, 39(4), 2422-2437.

HASTIE T. J. & R. J. TIBSHIRANI (1990): Generalized Additive Models. Chapman & Hall/CRC. ISBN 978-0-412-34390-2.

HERTIG E., A. SCHNEIDER, A. PETERS, W. VON SCHEIDT et al. (2019): Association of ground-level ozone, meteorological factors and weather types with daily myocardial infarction frequencies in Augsburg, Southern Germany. Atmos. Environment.

JACOB D., J. PETERSEN, B. EGGERT, A. ALIAS et al. (2014): EURO-CORDEX: new high resolution climate change projections for European impact research. In: Reg Environ Change., 563-578.

JENDRITZKY G., D. FIALA, G. HAVENITH, C. KOPPE et al. (2007): Thermische Umweltbedingungen. promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 83-94.

KUTTLER W. (2010): Urbanes Klima. Teil 1. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 70 7/8, 329-340.

MATZARAKIS A. (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas. Meteorologisches Inst. der Univ. Freiburg.

OKE T. R. (2006): Towards better scientific communication in urban climate. Theor. Appl. Climatol. 84, 179-190.

OKE T. R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. QJRMS 108(455), 1-24.

PORTIER C. J., K. THIGPEN TART, S. R. CARTER, C. H. DILWORTH et al.. (2010): A Human Health Perspective On Climate Change: A Report Outlining the Research Needs on the Human Health Effects of Climate Change. Research Triangle Park, NC: Environmental Health Perspectives/National Institute of Environmental Health Sciences.

REN C., M. S. O'NEILL, S. K. PARK, D. SPARROW et al. (2011): Ambient temperature, air pollution, and heart rate variability in an aging population. Am J Epidemiol 173(9), 1013-21.

REVI A., D. E. SATTERTHWAITE, F. ARAGÓN-DURAND, J. CORFEE-MORLOT et al. (2014): Urban areas. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaption, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 535-612.

SICARD P., E. AGATHOKLEOUS, V. ARAMINIENE E. CARRARI et al. (2018): Should we see urban trees as effective solutions to reduce increasing ozone levels in cities? Environmental Pollution, 243, 163-176.

VESCOVI L., M. REBETEZ & F. RONG (2005): Assessing public health risk due to extremely high temperature events: climate and social parameters. Climate Research, 30(1), 71-78.

WHO (World Health Organization) (2006): Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide. World Health Organization.

WHO (World Health Organization) (2008): Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution. World Health Organization, Kopenhagen, 93 S.

WHO (World Health Organization) (2013): Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. Technical Report. World Health Organization, Kopenhagen, 302 S.

WU S., L. MICKLEY, E. M. LEIBENSPERGER, D. JACOB et al. (2008): Effects of 2000–2050 global change on ozone air quality in the United States. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D6).

Kontakt:

Prof. Dr. rer. nat. Elke Hertig
Medizinische Fakultät
Universität Augsburg
elke.hertig@med.uni-augsburg.de

Hertig E. (2019): Gesundheitsrelevante Temperatur-Ozon-Ereignisse am Beispiel Bayern. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 133-140. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.19.

4.5 Zecken in der Stadt

Lidia Chitimia-Dobler & Gerhard Dobler

*Die Zunahme urbaner Lebensräume auf unserer Erde führt zu neuen und veränderten ökologischen Zonen und Beziehungsgefügen auch für Parasiten. Das Beispiel von drei verschiedenen Zeckenarten (*Ixodes ricinus, Dermacentor reticulatus, Rhipicephalus sanguineus*) zeigt, dass diese sich in unterschiedlichem Maße auf diese neuen Lebensräume adaptieren können und damit zu einem veränderten Risiko für die Übertragung von Pathogenen führen. Eine Generalisierung für einen Anstieg des Infektionsrisikos durch Zecken-übertragene Infektionen im Zuge der Urbanisierung ist damit nicht möglich. Jede in Frage kommende Zeckenart muss individuell aufgrund des jeweiligen Lebenszyklus betrachtet und eine Risikoeinschätzung der durch die Art übertragenen Pathogene vorgenommen werden.*

***Tick species in the City:** The increase in urban habitats causes new and changed ecological zones and systems. These changed new urban environments will be also used by new emerging and invading parasites. These changes will have a different impact for different tick species. The examples of three different tick species (*Ixodes ricinus, Dermacentor reticulatus, Rhipicephalus sanguineus*) show that each tick species may adapt in a different way to new urban habitats and may therefore cause changed risks of transmission of pathogens. A forecast of a generally increased risk of tick-transmitted infections is therefore non-reliable. The potential change of risk has to be evaluated individually for each tick species and its transmitted pathogens according to the respective tick life cycle.*

Städte werden in der Zukunft einen Großteil der menschlichen Bevölkerung beherbergen. Bis 2030 werden rund zwei Drittel der gesamten Weltbevölkerung in Städten (urban) und deren direkten Einzugsgebieten (periurban) leben (Population Reference Bureau, 1998). In den USA leben jetzt schon mehr als 80 % der gesamten Bevölkerung in urbanen Regionen (Knowlton 2001). Davon lebt rund ein Drittel in Städten mit fünf Millionen oder mehr Einwohnern (Knowlton 2001). Diese Entwicklung ist umso Besorgnis erregender, da die Urbanisation als einer der vier Hauptgründe genannt werden, die in der gegenwärtigen Entwicklung der Menschheit und der Erde einen Einfluss auf die menschliche Gesundheit aufweisen (Patz et al. 2004).

Urbanisation verändert dramatisch die Landschaft, deren Ökologie und damit auch die Zusammensetzung der Pflanzen- und Tiergemeinschaften, einschließlich des Vorkommens und der Häufigkeit von Zecken. Dabei weisen urbane Regionen einen stark fragmentierten Landschaftstyp auf, der aus Mosaiken unterschiedlicher Größe, unterschiedlichen Vegetationsstrukturen und Nutzungstypen besteht. Verschiedene Studien zeigen, dass in urbanen und peri-urbanen Arealen eine deutlich geringere Artenvielfalt mit der quantitativen Dominanz einzelner Arten herrschen kann. Diese Studien belegen, dass die Artenvielfalt indirekt korreliert mit dem Auftreten von Parasiten und Pathogenen.

Zecken in Deutschland

Zecken gelten als die ältesten bekannten Parasiten auf Erden. Sie haben sich nach gegenwärtigem Stand der Wissenschaft vor etwa 250 Millionen Jahren aus Milben entwickelt (Chitimia-Dobler et al. 2017). Daneben weisen sie die höchste Diversität von übertragenen Pathogenen auf. Insgesamt werden aktuell ca. 900 verschiedene Arten von Schildzecken und Lederzecken unterschieden. In Europa wurden bisher mehr als 50 verschiedene Zeckenarten beschrieben, in Deutschland sind es aktuell 18 Schildzecken-Arten und 2 Lederzecken-Arten (*Tab. 4.5-1*).

Urbane und peri-urbane Strukturen können direkte und indirekte Auswirkungen auf das Vorhandensein, die Aktivität und die Zahl vorhandener Zecken aufweisen. Als poikilotherme Tiere sind Zecken sehr stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Diese sind für die einzelnen Arten sehr verschieden. So benötigt der Gemeine Holzbock (*Ixodes ricinus*) eine Luftfeuchtigkeit von > 85 % um aktiv zu sein. Zecken der Gattung *Hyalomma* kommen vor allem in den Steppenregionen der Erde vor und scheinen sich bei Luftfeuchtigkeitswerten von >50 % nicht oder nur bedingt entwickeln zu können. Zecken benötigen Wirbeltiere als Quelle für ihre Blutmahlzeiten zur Entwicklung. Dabei gibt es weitgehend wirtsspezifische (stenöke) Zecken (z.B. *Ixodes vespertilionis*, eine Fledermauszecke, die ausschließlich an Fledermäusen Blut saugt und durch das Blut anderer Tiere sogar stirbt) und euryöke Arten, die an vielen Wirbeltieren Blut saugen, so z.B. *Ixodes ricinus*, der an > 300 verschiedenen Wirbeltierarten gefunden wurde (Bowman et al. 2008).

Auch auf Wirbeltiere (Wild- und Haustiere) als Blutquelle für Zecken hat die Urbanisation dramatische Auswirkungen. So können sich manche Arten sehr gut an die Umgebung des Menschen und an die veränderten Bedingungen in Städten anpassen, während andere Arten sich nicht anpassen und verschwinden. Für euryöke Zeckenarten kann dies zu Vorteilen führen, für stenöke Zeckenarten führt die Reduzierung oder gar das Verschwinden ihres Wirts hingegen meist zum Verschwinden der Zeckenart.

Daher sind Verallgemeinerungen für das Auftreten oder Verschwinden von Zecken schwierig und müssen unter den gegebenen Bedingungen für einzelne Zeckenarten diskutiert werden.

Ixodes ricinus – der Gemeine Holzbock

Ixodes ricinus, der Gemeine Holzbock ist die häufigste in Europa vorkommende und am weitesten verbreitete Zeckenart überhaupt. Er kommt von Skandinavien bis Italien und von England bis in den Europäischen Teil Russlands vor. Es handelt sich dabei um eine Zeckenart, die in ihrer Entwicklung drei Stadien (Larve-Nymphe-Adulte) durchmacht, die auf drei unterschiedlichen Wirten stattfinden können. Damit sind die Umweltbedingungen für diese Zeckenart anscheinend sehr komplex, da sie nur dort vorkommen kann, wo die Bedingungen für das Überleben aller drei Stadien



Abb. 4.5-1: Ixodes ricinus *(»Gemeiner Holzbock«) Weibchen (© Dr. Chitimia-Dobler, Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München)*

Tab. 4.5-1: *Zeckenfauna Deutschlands mit Lebensweise*

Gattung	Zeckenart	Lebensweise
Argas	*Argas reflexus*	„Taubenzecke“; endophil, überwiegend stenök, vorwiegend Tauben, selten andere Vögel, sehr selten Mensch
	Argas vespertilionis	endophil; stenök, ausschließlich Fledermäuse
Dermacentor	*Dermacentor reticulatus*	„Auwald-Zecke“; Larven und Nymphen endophil in Mäusebauten, Adulte exophil euryök, an größeren Wild- und Haustieren incl. Mensch
	Dermacentor marginatus	„Bunte Schafzecke“; Larven und Nymphen endophil in Mäusebauten, Adulte exophil euryök, an Ein- und Paarhufern incl. Mensch
Haemaphysalis	*Haemaphysalis concinna*	„Rote Rehzecke“; exophil, alle 3 Stadien euryök an verschieden großen Wirten
	Haemaphysalis punctata	„Rote Schafszecke“; exophil, euryök , euryök, Larven, Nymphen an Nagetieren, Vögeln, Adulte überwiegend an ein- und Paarhufern,
Ixodes	*Ixodes ricinus*	alle 3 Stadien exophil, euryök, viele verschiedene Wirte
	Ixodes inopinatus	alle 3 Stadien exophil, euryök, viele verschiedene Wirte
	Ixodes acuminatus	endophil, stenök in Mäusebauten
	Ixodes apronophorus	„Sumpfzecke“; endophil euryök, bei Nagern entlang von Gewässern
	Ixodes arboricola	endophil, stenök, Vogelnester
	Ixodes lividus	endophil, stenök, Vogelnester
	Ixodes canisuga	„Fuchszecke“; endophil, bei Füchsen, selten bei Hunden
	Ixodes cornutus	endophil bei Marder (bisher einmaliger Nachweis in Deutshcland
	Ixodes hexagonus	„Igelzecke“; endophil bei Igel, Marder, Füchse
	Ixodes rugicollis	endophil bei Igel, Marder, Füchse
	Ixodes frontalis	endophil, Larven und Nymphen vereinzelt exophil; stenök, ausschließlich Vögel
	Ixodes trinaguliceps	endophil in Mäusebauten
	Ixodes simplex	endophil, stenök, ausschließlich Fledermäuse
	Ixodes vespertilionis	endophil, stenök, ausschließlich Fledermäuse

und für die dazu benötigten Wirbeltier-Wirte vorhanden sind. *Ixodes ricinus* ist ausschließlich exophil und benötigt für die Entwicklung eine differenzierte Vegetation mit kleinen und mittelhohen Pflanzen, die er für seine Wirtssuche benutzt. Für ausreichend hohe Populationen müssen kleine (vorwiegend für Larven und Nymphen) und mittelgroße Wirbeltiere (für Nymphen und Adulte) als Wirte vorhanden sein. Da *Ixodes ricinus* nur insgesamt wenige Tage in jedem Stadium am Wirt verbringt und die meiste Zeit des Lebens (bis zu 2 Jahre) in der Umwelt, um auf Wirte zu warten, sind die Umweltbedingungen besonders bedeutsam für das Überleben dieser Zeckenart. Aufgrund dieser Bedingungen für die Lebensweise dieser Zeckenart findet sich *Ixodes ricinus* insbesondere in urbanen und periurbanen Arealen mit Parkanlagen, Gärten und Friedhofsanalgen mit entsprechendem Vegetationsbewuchs mit ausreichender Streuschicht, sowie einer ausreichenden Zahl von Wirtstieren (Dautel et al. 1999).

Aktuell gibt es eine Reihe von Untersuchungen zur Häufigkeit von Pathogenen (u.a. FSME, *Borrelia burgdorferi* s. l., Anaplasmen, Neoehrlichien, Rickettsien) in urbanen Regionen (u.a. Rizzoli et al. 2014). Allerdings zeigen nur wenige Studien Ergebnisse zur urbanen/periurbanen und silvatischen (im Sinn von nicht-urban) vergleichenden Zeckenabundanz. Die Ergebnisse einer Studie zeigen, dass die Zahlen der adulten Weibchen (*Abb. 4.5-2*) und der Nymphen (*Abb. 4.5-3*) in urbanen, suburbanen und ländlichen Habitaten nicht grundlegend voneinander verschieden sind (Buczek et al. 2014). Der Vergleich der beiden suburbanen Studienareale zeigt deutlich, dass es nicht so sehr auf den Landschaftstyp, sondern auf den jeweiligen individuellen Standort ankommt, mit welcher Zeckenabundanz jeweilig zu rechnen ist. Allerdings zeigen sich in dieser Studie, dass die Zahl der Nymphen im länd-

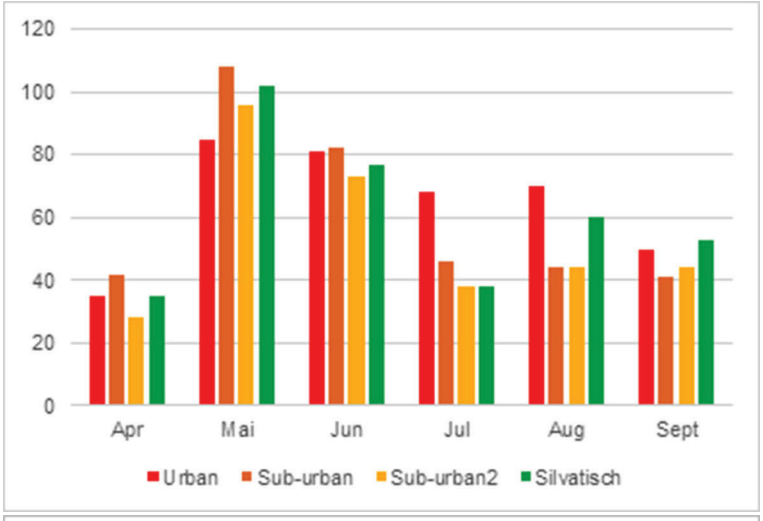


Abb. 4.5-1: *Zahl der standardisiert gesammelten* Ixodes ricinus*-Weibchen in einer urbanen, zwei peri-urbanen und einer ländlichen Region Polens (mod. nach Buczek et al. 2014).*

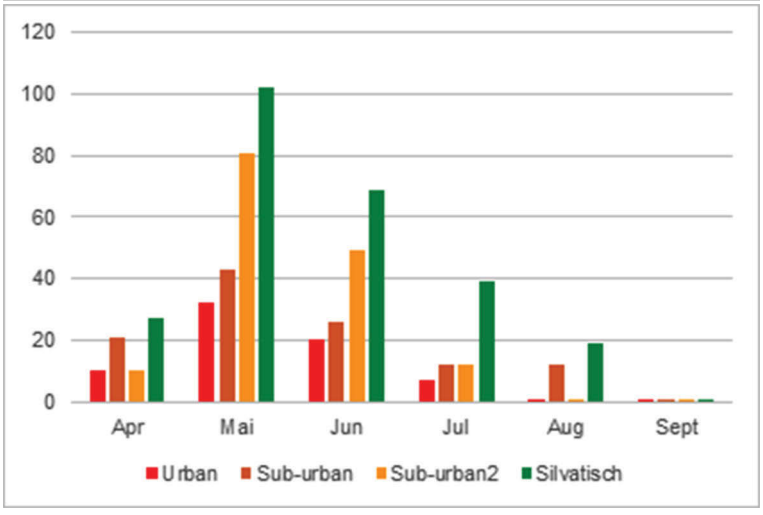


Abb. 4.5-3: *Zahl der standardisiert gesammelten* Ixodes ricinus*-Nymphen in einer urbanen, zwei peri-urbanen und einer ländlichen Region Polens (mod. nach Buczek et al. 2014)*

lichen Studienbereich in allen Monaten deutlich höher war als im urbanen Areal. Dies schien jedoch keinerlei Auswirkung auf die Zahl der sich daraus entwickelten adulten Zecken zu haben. Bisher gibt es zum Überleben einzelner Zeckenstadien in unterschiedlichen Landschaftstypen keine Untersuchungen.

Sehr ähnliche Ergebnisse liefert eine Studie ebenfalls aus Polen, die die *Ixodes ricinus*-Abundanz von einem Stadtpark mit einem Urwald vergleicht (Kowalec et al.). Auch hier zeigten sich insbesondere bei der Abundanz deutliche Unterschiede mit im Frühjahr deutlich höheren Zahlen im Wald, während die Zahlen insgesamt im Herbst keine signifikanten Unterschiede zeigten.

In den letzten Jahren wurden vermehrt FSME-Fälle aus neu gebauten urbanen Gebieten gemeldet (Dobler, pers. Beobachtung). Es fällt auf, dass vor allen Siedlungsränder mit Nähe zu fragmentierten Wald-Wiesen-Arealen hier eine wichtige Rolle zu spielen scheinen. Dabei werden die Zecken häufig in den zu den Siedlungen gehörigen Gartenanteilen erworben. Diese Beobachtung zeigt, dass vermutlich viele FSME-Naturherde in der Natur vorkommen, die bisher nicht entdeckt wurden, da der Mensch nicht in Kontakt mit den Zecken (*Ixodes ricinus)* gekommen ist und damit keine Erkrankungsfälle auftraten. Die zunehmende Zersiedelung und immer größere Ausbreitung der Siedlungsräume führt zu einem zunehmenden Kontakt von Wildtieren (Kleinnagern, Igeln, Hasen Füchsen, Rehen usw.), die infizierte Zecken aus den nahe gelegenen Waldarealen in die Nähe der Siedlungen bringen. Ein zunehmendes Problem in den letzten Jahren stellen Waldkindergärten dar. Hier kam es insbesondere im Jahr 2018 zu einer auffälligen Häufung von FSME-Fällen bei Kindern (Dobler, pers. Beobachtung). Hier dürfte die zunehmende Urbanisierung zum Wunsch nach Natur und zu einem Aufwachsen in Kontakt mit der Natur führen, was einen Anstieg des Infektionsrisikos mit Zecken-übertragenen Pathogenen zur Folge hat.

Zur Frage der vergleichenden Vektor-Prävalenz in *Ixodes ricinus* in urbanen Arealen und ländlichen Regionen liegt für die verschiedenen Pathogene eine Reihe von Studien vor. Eine Zusammenfassung dieser Studien ergibt kein einheitliches Bild. Insgesamt scheint die Pathogen-Prävalenz in den einzelnen Regionen unterschiedlich und mehr von den lokalen Umwelt-Gegebenheiten abzuhängen als vom Landschaftstyp. Diese bedeutet jedoch auch, dass das Infektionsrisiko mit durch *Ixodes ricinus* übertragenen Pathogenen grundsätzlich in urbanen periurbanen und silvatischen Arealen als ähnlich eingeschätzt werden muss.

Dermacentor reticulatus – die Auwaldzecke

Dermacentor reticulatus, die Auwaldzecke (*Abb. 4.5-4*) ist die Zeckenart, die in den letzten Jahren eine deutliche Ausbreitungstendenz in Deutschland und Mitteleuropa zeigte. Die Auwald-Zecke weist ein teil-endophiles Verhalten auf (Földvári et al. 2016). Larven und Nymphen dieser Zeckenart kommen üblicherweise nicht frei vor, sondern halten sich in den Nestern von Wühlmäusen auf. Sie finden sich sporadisch an Nagetieren. Die adulten Stadien hingegen finden sich in der Vegetation und warten dort auf größere Wald- und Haustiere, von denen sie abgestreift werden. Sie weisen damit eine euryöke Lebensweise auf. *Dermacentor reticulatus* gehört zu den sich am schnellsten entwickelnden Zeckenarten. Der gesamte Entwicklungszyklus vom Ei bis zum adulten Tier kann innerhalb eines Jahres abgeschlossen werden.

Während in der älteren Literatur dieser Zeckenart überhaupt keine Bedeutung für Mitteleuropa zugemessen wurde, findet sie sich seit einigen Jahren zunehmend im Osten und Norden Deutschlands und breitet sich rasant in Richtung Westen aus. *Dermacentor reticulatus* scheint eine deutlich höhere Toleranz gegenüber kälteren Temperaturen und gegenüber Niederschlägen zu haben (Hubalek et al. 2003). Damit ist die Auwaldzecke v.a. im Spätwinter und Frühjahr sowie im Herbst und Frühwinter aktiv. Die zunehmende Trockenheit und auch die wärmeren Temperaturen der letzten Jahre scheinen die Ausbreitung dieser Zeckenart eher zu begünstigen, da sie sich über den Sommer in den Nagerhöhlen im Larven- und Nymphenstadium befindet und damit nicht den hohen Temperaturen ausgesetzt ist. Durch ihre Lebensweise und ihr Verhalten scheint die Auwaldzecke nach den bisherigen Beobachtungen zu den Gewinnern der Klimaänderung zu zählen.



Abb. 4.5-4: Dermacentor reticulatus *(»Auwald-Zecke«) Weibchen (© Dr. Chitimia-Dobler, Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München).*

Dermacentor reticulatus ist mit einer Reihe von Pathogenen assoziiert. Neben dem Omsk Hämorrhagischen Fieber in Mittelsibirien konnte kürzlich auch ein FSME-Virus-Naturherd in Nordsachsen nachgewiesen werden, in dem die Auwaldzecke eine wichtige Rolle für die Aufrechterhaltung spielt (Chitimia-Dobler et al. 2019). Daneben spielt *Dermacentor reticulatus* für Rickettsien (*Rickettsia raoultii*) eine wichtige Rolle. Weitere Bakterien, u.a. der Erreger des Q Fiebers und der Tularämie scheinen mit der Auwaldzecke assoziiert zu sein, deren Bedeutung als echter Vektor auf Mensch und Tier ist bisher nicht geklärt. Gefürchtet ist die Zeckenart auch als Überträger der sog. »Hundemalaria« (Babesiose des Hundes). Diese Erreger könnten sich in der Zukunft im Rahmen einer weiteren Ausbreitung von *Dermacentor reticulatus* weiter ausbreiten und auch vermehrt auftreten. Dabei tritt der Erreger sowohl in urbanen als auch in silvatischen Landschaftstypen auf (Kubiak et al. 2018).

Rhipicephalus sanguineus – die Braune Hundezecke

Rhipicephalus sanguineus, die Braune Hundezecke (*Abb. 4.5-5*), ist die am weitesten verbreitete Zeckenart weltweit. Sie kommt mittlerweile in Südeuropa, großen Teilen Afrikas, Asiens, Nord- und Südamerikas und Australiens vor. Sie ist ein eindrückliches Beispiel für die Verbreitung eines Ektoparasiten durch menschliche Aktivitäten (Verbringung von Haushunden) über die gesamte Erde. Mittlerweile ist klar, dass es sich bei *Rhipicephalus sanguineus* um ein Konglomerat von nur genetisch, aber nicht morphologisch unterscheidbaren Arten handelt. Diese Unterscheidung hat große Bedeutung, da gezeigt werden konnte, dass die genetisch unterschiedlichen Arten (Genospezies) eine unterschiedliche Vektorkompetenz aufweisen. Die tropenadaptierte Zeckenart ist nicht in der Lage Rickettsien zu übertragen, während die an gemäßigte Klimate angepasste Art den wichtigsten Überträger des Mittelmeerfiebers (*Rickettsia conorii*) und in bestimmten Regionen Nord- und Mittelamerikas für einen urbanen Zyklus des Rocky Mountain-Fleckfiebers (*Rickettsia rickettsii*) darstellt.



Abb. 4.5-5: Rhipicephalus sanguineus *(»Braune Hundezecke«) Weibchen (© Dr. Chitimia-Dobler, Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München).*

Die Braune Hundszecke weist eine weitgehend endophile Lebensweise auf. Sie hält sich überwiegend in Hundebehausungen (Höhlen, Hütten, Wohnungen) auf. Dort leben alle drei Stadien in enger Beziehung zu ihrem hauptsächlichen Wirt, dem Hund (*Canis familiaris*). Sie weisen daher ein überwiegend stenökes Verhalten auf, wobei sie bei Mangel an Hunden oder besonders hohen Zeckenpopulationen auch an anderen Wirten (u.a. dem Menschen) Blut saugen können und damit auch entsprechende Erreger übertragen. *Rhipicephalus sanguineus* kommt bisher ausschließlich in den subtropischen und tropischen Regionen unserer Erde vor, da die Außen-Temperaturen in Mitteleuropa autochthone Populationen bisher nicht zulassen.

Die urbane Lebensweise des Menschen in Mitteleuropa und insbesondere seines Haustiers Hund haben jedoch in den letzten Jahren für *Rhipicephalus sanguineus* Lebensbedingungen geschaffen, die sie aufgrund seiner ausschließlich endophilen Lebensweise auch befähigen, nach Einschleppung nach Mitteleuropa in Wohnungen mit Hunden zu überleben. In der letzten Zeit wurden Wohnungen in Deutschland gemeldet, die von der Braunen Hundezecke infestiert sind und in denen sich so hohe Zeckenpopulationen entwickeln, dass diese Wohnungen für Menschen unbewohnbar werden (Dautel, pers. Komm. 2019). *Rhipicephalus sanguineus* stellt damit ein Beispiel einer Zeckenart dar, die durch ihre Adaptierung an menschliche Verhaltensweisen schon mehrfach vom Menschen profitierte. Durch die zunehmende Urbanisierung und den Wunsch hier Haustiere zu halten sowie die zunehmende Reisetätigkeit in warme Regionen unserer Erde gemeinsam mit den Haustieren werden Ektoparasiten in gemäßigte Regionen eingeschleppt, die bisher hier nicht vorkommen und die unter ganz definierten Bedingungen (im Fall von *Rhipicephalus sanguineus* eine endophile Lebensweise) hier leben und ggf. auch Pathogene übertragen können.

Ausblick

Es stellt sich zum Schluss die Frage, mit welchen weiteren Entwicklungen zu rechnen sein wird. Im Zuge des Klimawandels sagen viele Forscher eine Zunahme der Ektoparasiten, u.a. auch der Zecken und der von ihnen übertragenen Pathogene voraus. Wie unsere Ausfüh-

rungen zeigen, müssen die Entwicklungen sehr differenziert betrachtet werden. Die moderne Städteplanung sieht zunehmend Grünflächen für ein lebensfreundlicheres Klima in den Städten vor. Diese fragmentierten Flächen können Lebensräume für Zecken darstellen und durch ihren Freizeit-Wert kommen Menschen mit Zecken in Kontakt. Die zunehmende Erwärmung kann jedoch zum Verschwinden einheimischer Zeckenarten und zum Auftreten neuer Zeckenarten mit veränderten Lebensbedingungen führen. Der intensive Güter- und Menschentransport verbringt immer wieder tropische Zeckenarten in die gemäßigten Zonen, die sich unter geeigneten Bedingungen als Neozoen ansiedeln und ggf. auch neue Pathogene einschleppen und übertragen können. Welche Auswirkungen dies auf einheimische Arten haben kann, ist für Zecken bisher völlig unklar. Gleichzeitig können durch die erhöhten Temperaturen in Städten die Aktivitätsperioden von Zecken verlängert werden und so z.B. eine ganzjährige Aktivität von *Ixodes ricinus* ermöglichen. Eine entsprechende Entwicklung zeichnet sich bereit für Deutschland ab. Zu warme Temperaturen und geringere Luftfeuchtigkeit kann jedoch auch zum Verschwinden von *Ixodes ricinus* führen, bedingt durch deren exophile Lebensweise.

Die Auwaldzecke als teil-endophile Zeckenart und die Hundezecke als ausschließlich endophile Zeckenart können von diesen Entwicklungen jedoch profitieren und sich durch ihre Lebensweise and diese Veränderungen gut adaptieren und ausbreiten. Aufgrund der bisher nur unvollkommen verstandenen Ökologie unserer Zeckenarten liefern Modelle nur unvollkommene Vorhersagen über die zukünftigen Entwicklungen. Zecken sind die ältesten bekannten Parasiten und haben sich an eine Vielzahl von Veränderungen in der Erdgeschichte angepasst. Sie werden auch Wege finden, die aktuellen Veränderungen für sich und ihre Lebensweise zu nutzen.

Literaturverzeichnis

BECK S., C. SCHREIBER, E. SCHEIN, J. KRÜCKEN et al. (2014): Tick infestation and prophylaxis of dogs in northeastern Germany: a prospective study. Ticks Tick Borne Dis. 5:336-342.

BOWMANN A. & P. (NUTTAL) (2008): Ticks – Biology, Disease and Control. NY, New York, Cambridge University Press.

BUCZEK A., D. CIURA, K. BARTOSIK, Z. ZAJĄC & J. KULISZ (2014): Threat of attacks of *Ixodes ricinus* ticks (Ixodida: Ixodidae) and *Lyme borreliosis* within urban heat islands in south-western Poland. Parasites & Vectors 2014, 7:562.

CHITIMIA-DOBLER L., B. C. DE ARAUJO, B. RUTHENSTEINER, T. PFEFFER & J. A. DUNLOP (2017): *Amblyomma birmitum* a new species of hard tick in Burmese amber. Parasitology 144(11):1441-1448.

CHITIMIA-DOBLER L., G. LEMHÖFER, N. KRÓL, M. BESTEHORN, G. DOBLER & M. PFEFFER (2019): Repeated isolation of tick-borne encephalitis virus from adult *Dermacentor reticulatus* ticks in an endemic area in Germany. Parasit Vectors 12(1):197.

DAUTEL H. & O. KAHL (1999): Ticks (Acari: Ixodoidea) and their Medical Importance in the Urban Environment. In: Robinson W. H., F.Rettich & G. W. Rambo (eds.). Proceedings of the Third International Conference on Urban Pests. 1999, Prague, pp. 73-82.

DAUTEL H., C. DIPPEL, R. OEHME, K. HARTELT & E. SCHETTLER (2006): Evidence for an increased geographical distribution of *Dermacentor reticulatus* in Germany and detection of *Rickettsia* sp. RpA4. Int J Med Microbiol. 296:149-56.

FÖLDVÁRI G., P. ŠIROKÝ, S. SZEKERES, G. MAJOROS & H. SPRONG (2016): *Dermacentor reticulatus*. A vector on the rise. Parasites & Vectors 9:314.

HUBALEK Z., J. HALOUZKA & Z. JURICOVA (2003): Host-seeking activity of ixodid ticks in relation to weather variables. J Vector Ecol. 28:159-65.

KNOWLTON K. (2001): Urban history, urban health. Am J Public Health 91:1944-1946.

KOWALEC M., T. SZEWCZYK, R. WELC-FALĘCIAK, E. SINSKI E et al. (2017): Ticks and the city - are there any differences between city parks and natural forests in terms of tick abundance and prevalence of spirochaetes? Parasites & Vectors (2017) 10:573.

KUBIAK K., H. SIELAWA, J. DZIEKOŃSKA-RYNKO, D. KUBIAK et al. (2018): *Dermacentor reticulatus* ticks (Acari: Ixodidae) distribution in north-eastern Poland: an endemic area of tick-borne disease. Exp Appl Acarol. 75:289-298.

PATZ J. A., P. DASZAK, G. M. TABOR, A. A. AGUIRRE et al. & Members of the Working Group on Land Use Change and Disease Emergence (2004): Unhealthy Landscapes: Policy Recommendations on Land Use Change and Infectious Disease Emergence. Environ Health Perspect 112:1092-1098.

POPULATION REFERENCE BUREAU (1998): 1998 World Population Data Sheet. Washington, DC: Population Reference Bureau.

RIZZOLI A., C. SILAGHI, A. A. OBIEGAL, I. RUDOLF et al. (2014): *Ixodes ricinus* and its transmitted pathogens in urban and peri-urban areas in Europe: New hazards and relevance for public health. Front Public Health 2:251.

Kontakt:
PD Dr. Lidia Chitimia-Dobler
PD Dr. Gerhard Dobler
Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München
gerharddobler@bundeswehr.org

Chitimia-Dobler L. & G. Dobler (2019): Zecken in der Stadt. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 141-146. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.20.

4.6 Hantaviren: Eine potentielle Gefahr als Folge der Erderwärmung? - Anmerkungen

José L. Lozán & Sandra Essbauer

Die Meldungen von klinisch auffälligen Hantavirus-Infektionen bei Menschen lagen in Deutschland von 2001 bis 2003 bei 106 bis 172 Fällen pro Jahr. Seit 2005 sind die Meldungen schwankend aber deutlich angestiegen; der höchste Wert wurde 2012 mit 2370 Fällen registriert. Eine Zunahme der Infektionen wird auch in anderen europäischen Ländern beobachtet. Das Auftreten von Hantaviren ist eng mit Kleinsäugern (u. a. Mäuse, Ratten und Spitzmäuse) assoziiert. Die meisten Fälle werden in Deutschland durch das Puumala-Orthohantavirus (PUUV) verursacht, das von der Rötelmaus (Myodes glareolus) übertragen wird. Die Untersuchungen in Waldgebieten lassen eine Korrelation zwischen der Anzahl der Infektionen und dem Anstieg der Mäusepopulation erkennen. Dies kann z.B. durch Buchenmast bedingt sein. Folgende Gegenden wurden als endemische Gebiete für PUUV-Infektionen identifiziert: Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Hessen.

Hantaviruses: Potential hazard as a result of global warming? – Remarks. *The reports of clinically registered human hantavirus infections in Germany were between 106 and 172 cases per year from 2001 to 2003. Since 2005 the numbers of reported cases have been fluctuating but nevertheless were significantly increasing; the highest value was registered in 2012 with 2370 cases. An increase of human infections has also been observed in other European countries. The occurrence of hantaviruses is closely associated with small mammals (including mice, rats and shrews). Most cases in Germany are caused by the Puumala Orthohantavirus (PUUV), which is transmitted by bank voles (Myodes glareolus). The investigations in forest areas revealed a correlation between the number of infections and the increase in mouse populations. This can e.g. be connected with strong beech masts. The following areas have been identified as endemic areas for PUUV infections: Baden-Württemberg, Bavaria, Lower Saxony, North Rhine-Westphalia and Hesse.*

Seit Einführung des Infektionsschutzgesetzes (IfSG) im Jahr 2001 gibt es in Deutschland eine Meldepflicht für akute, das heißt, klinisch auffällige, Hantavirus-Infektionen (siehe SurvStat@RKI 2.0). Die Zahlen der jährlich gemeldeten Hantavirus-Fälle bei Menschen unterliegen in Deutschland starken regionalen und saisonalen Schwankungen und waren deutlich erhöht in den Jahren 2007, 2010, 2012 und 2017 (*Abb. 4.6-1*). Die Kernsymptome der Infektionen bei Menschen schwanken in Europa von unspezifischen Grippe-ähnlichen Symptomen bis zu hohem Fieber, Myalgien (Muskelschmerzen), Kopfschmerz, gastrointestinalen Beschwerden und akutem Nierenversagen. Im Jahr 2012 wurde mit 2.370 gemeldeten Fällen in Deutschland der bis jetzt höchste Wert erreicht. Das weltweite Auftreten von Hantaviren ist eng mit Kleinsäugern assoziiert. Zu dieser Gruppe gehören die Ordnung der Nagetiere (u. a. Mäuse und Ratten) sowie die Ordnung der Insektenfresser (u. a. Spitzmäuse). Kleinsäuger sind natürliche Reservoirwirte von unterschiedlichen Hantaviren, meist ohne dabei selbst zu erkranken. Die meisten Hantavirus-Infektionen bei Menschen in Deutschland werden in West- und Süddeutschland beobachtet (Drewes et al. 2017) (*Abb. 4.6-2*); sie werden durch das von der Rötelmaus (*Myodes glareolus*) übertragene Puumala-Orthohantavirus (PUUV) verursacht. Infektionen in Ost- und Nordostdeutschland sind weniger häufig und wurden vermutlich durch eine in anderen Gebieten erfolgte Ansteckung mit PUUV oder durch das Dobrava-Belgrad-Orthohantavirus (DOBV) Genotyp Kurkino (Reil et al. 2018) hervorgerufen, dessen Wirt die Brandmaus (*Apodemus agrarius*) ist. Vor wenigen Jahren wurden neue Hantaviren bei Spitzmäusen, Maulwürfen und Fledermäusen beschrieben (z.B. Holmes & Zhang 2015; Essbauer & Krautkrämer, 2015).

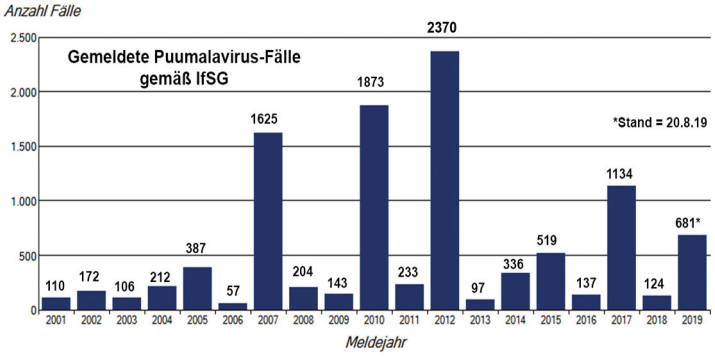


Abb. 4.6-1: *Gemeldete Puumala-Orthohantavirus-Fälle seit Einführung des IfSG (Daten: SurvStat@RKI 2.0, https://survstat.rki.de, Abfragedatum: 20.08.2019). Die Anzahl der gemeldeten Dobrava-Belgrad-Orthohantavirus-Fälle im gleichen Zeitraum schwankten zwischen 0 (2003) und 33 (2012). Hantavirus-Fälle, die nicht eindeutig zugeordnet werden konnten, kommen hinzu.*

Zur Geschichte der Hantaviren

Hantaviren rückten Anfang der 1950er-Jahre während des Korea-Krieges in den Fokus der Wissenschaft, als mehr als 3.000 nordamerikanische Soldaten sich mit dem damals unbekannten Erreger infizierten und an hämorrhagischem Fieber erkrankten. Die Erreger gehören zur Familie Orthohantaviridae, die unter anderem die humanpathogenen Arten Puumala-Orthohantavirus (PUUV), Dobrava-Belgrad-Orthohantavirus (DOBV), Tula-Orthohantavirus (TULV), Seoul-Orthohantaviruss (SEOV), Sin-Nombre-Orthohantavirus (SNV) und Andes-Orthohantavirus (ANDV) umfasst. Das PUUV, das eine weite Verbreitung in Europa und Asien hat, wurde Anfang der 1980er-Jahre u. a. in Finnland entdeckt. Heyman et al. 2011 berichteten über PUUV-Infektionen bei Menschen in Skandinavien, Mittel- und Westeuropa; bis heute sind aus Europa nur wenige Todesfälle bekannt.

Regionale Verbreitung der Hantaviren

Abb. 4.6-2 zeigt die Verteilung der Hantavirus-Fälle in Deutschland zusammengefasst für die Jahre 2001-2016. Die dunkelblau gefärbten Gebiete sind diejenigen, in denen häufig über lange Zeiträume Infektionen mit dem PUUV auftreten (Endemiegebiete). Dabei handelt es sich um bestimmte Gegenden von Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Hessen, z. B. die schwäbische Alb, den Spessart, den Bayerischen Wald, den Raum Osnabrück etc. In *Abb. 4.6-3* ist die Verteilung der klinisch auffälligen Hantavirus-Fälle im Jahr 2012 und 2017 dargestellt, den letzten beiden starken Ausbruchsjahren (hierzu siehe *Abb. 4.6-1*). Die Verteilungsähnlichkeit bestätigt die o. g. Endemiegebiete. Wie es zu erwarten ist, wurden auch in den dunkelblau gefärbten Gebieten PUUV-positive Rötelmäuse nachgewiesen (*Abb. 4.6-2*).

Wie aus *Abb. 4.6-1* ersichtlich, schwankt die Zahl der Krankheitsfälle beim Menschen von Jahr zu Jahr stark. Dies korreliert u. a. mit vielen Bucheckern (»Buchenmast«). Durch gute Nahrungsbedingungen können die Reservoirwirte den Winter besser überleben und im nächsten Jahr Populationen mit hohen Individuendichten erreichen (Reil et al. 2015). Zudem wurde eine Abhängigkeit der PUUV-Seroprävalenz (Anzahl der serologisch Hantavirus-Positiven zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer bestimmten Population)

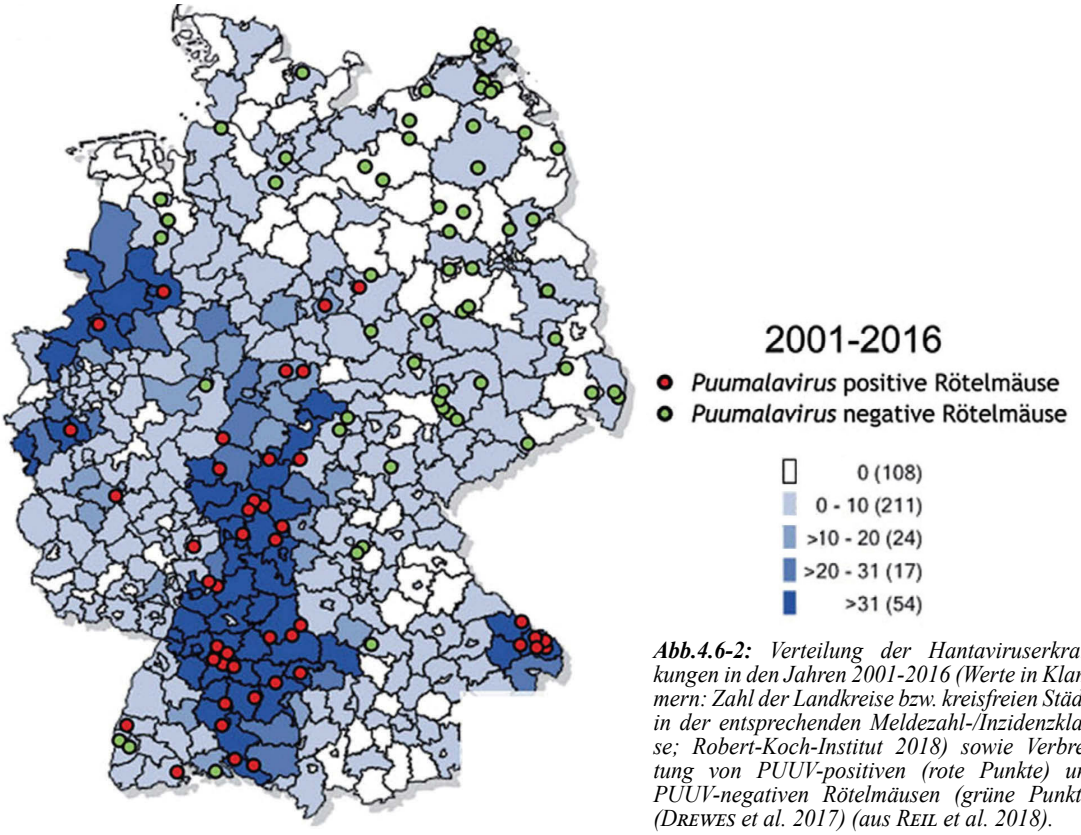


Abb.4.6-2: *Verteilung der Hantaviruserkrankungen in den Jahren 2001-2016 (Werte in Klammern: Zahl der Landkreise bzw. kreisfreien Städte in der entsprechenden Meldezahl-/Inzidenzklasse; Robert-Koch-Institut 2018) sowie Verbreitung von PUUV-positiven (rote Punkte) und PUUV-negativen Rötelmäusen (grüne Punkte) (Drewes et al. 2017) (aus Reil et al. 2018).*

von mehrjährigen aber auch saisonalen Schwankungen der Kleinsäugerzahl festgestellt (Reil et al. 2017). Das heißt, es besteht bei hohen Populationsdichten eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Weitergabe der Viren von Tier zu Tier und die Gefahr einer Hantavirus-Infektion bei Menschen in den betroffenen Gebieten. Auf der Basis dieser Information zusammen mit Wetterparametern (Temperaturen und Niederschlägen) wird versucht, anhand von Modellen eine Vorhersage von PUUV-Erkrankungshäufungen zu machen (Reil et al. 2018). Frühzeitige Warnungen vor steigenden Infektionen könnten den öffentlichen Gesundheitsdienst verbessern.

Übertragung der Hantaviren

Hantaviren werden von infizierten Kleinsäugern über Speichel, Urin und Kot ausgeschieden und bleiben je nach Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit etwa bis zu zwei Wochen infektiös. Eine Übertragung auf den Menschen (Zoonose) erfolgt meist indirekt durch Einatmen von Virus-belasteten Stäuben. Weitere Infektionen gibt es durch direkten Kontakt mit den Nagetieren und deren Ausscheidungen. Es gibt daher eine besondere Gefährdung beim Aufenthalt in Schuppen, Ställen oder Häusern, in denen Nagetiere vorkommen oder vorkamen. Staubentwicklung sollte daher vermieden werden und mit Ausscheidungen der Nagetiere kontaminierte Bereiche sollen befeuchtet werden, um eine Staubaufwirbelung zu verringern. Auch bei Arbeiten im Garten und in der Landwirtschaft kann man sich infizieren.

Ein erhöhtes Infektionsrisiko durch Orthohantaviren gibt es in Wäldern besonders nach einem Mastjahr. Zu den hochgefährdeten Personen gehören z.B. Waldarbeiter. Bei Gartenarbeiten können die Viren auch über kleine Verletzungen in den Körper eindringen. Auch durch Einnahme verunreinigter Lebensmittel ist eine Infektion möglich. Es wird daher empfohlen beim Reinigen von mit Mäuseauscheidungen kontaminierten Bereichen oder beim Entfernen von toten Mäusen, eine Atemschutzmaske (Typ FFP3) und Handschuhe zu tragen. Nach den Arbeiten wird ein gründliches Waschen der Hände mit Seife empfohlen. *Abb. 4.6-4* zeigt, dass die meisten Infektionen zwischen der 20. und 30.Woche registriert werden. Auch während dieser Jahreszeit wird die höchste Individuendichte beobachtet (Reil et al. 2017). Die Autoren untersuchten 2.800 Rötelmäuse aus ganz Deutschland von 2010 bis 2013 und stellten fest, dass 566 (20 %) Individuen PUUV-positiv waren. Fast 99 % (561 Mäuse) der Tiere stammten aus Gebieten in Süd- oder Westdeutschland und nur 5 Tiere aus Nord- und Ost-Deutschland. Das bestätigt die o. g. Beobachtung von Drewes et al. (2017). Reil et al. (2017) konn-

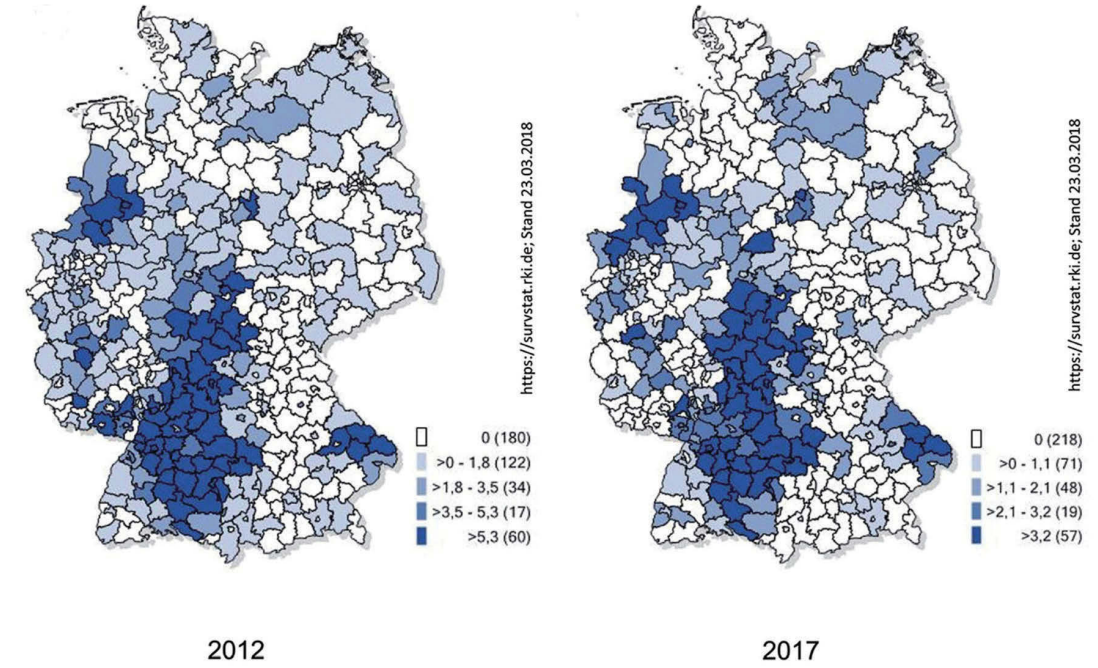


Abb.4.6-3: *Hantavirus-Erkrankungen in den Jahren 2012 (links) und 2017 (rechts). Werte in Klammern: Zahl der Landkreise bzw. kreisfreien Städte in der entsprechenden Meldezahl-/Inzidenzklasse (Robert Koch-Institut 2018) (aus Reil et al. 2018).*

ten auch bei dieser Untersuchung die höchste Anzahl der PUUV-positiven Tiere im Sommer 2010 und 2012 feststellen. Wie oben bereits erwähnt, sind dies die Jahre mit den überhöhten gemeldeten Hanta-Virus-Fällen.

Symptome bei einer Infektion – Vorbeugemaßnahme

Die klinischen Symptome und die Schwere einer Hantavirus-Infektion hängen im Allgemeinen von der Orthohantavirus-Spezies ab. Bisher sind zwei Syndrome bekannt. Das hämorrhagische Fieber mit Nierensyndrom (HFRS) und das Hantavirus Cardiopulmonare-Syndrom (HCPS). HFRS tritt in Europa, Asien und Afrika auf (Cunze et al. 2018) und führt beim Menschen häufig zu fiebrigen grippeähnlichen Symptomen, was eine nicht zu unterschätzende Dunkelziffer an Nicht- und Fehldiagnosen vermuten lässt. Erste Beschwerden zeigen sich in der Regel 2 bis 4 Wochen nach der Ansteckung. Bei schweren Verläufen können Nierenfunktionsstörungen, Nierenversagen oder sogar Nierenschädigung und Blutungen (hämorrhagisch) auftreten.

Informationen zur klinischen Symptomatik sind enthalten unter: *https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/Ratgeber_Hantaviren.html.*

Gegen eine Hantavirusinfektion gibt es keinen Impfstoff. Vorbeugemaßnahmen (Prophylaxe) sind daher wichtig (siehe hierzu Merkblatt 2019: Wie vermeide ich Hantavirusinfektionen? *https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00020232/Hantavirus-Informationsblatt_2019.pdf.*

Schlussbetrachtung

Als Folge der Erderwärmung werden die Winter milder, die häufige Mastjahre der Buchen begünstigen können und so Jahre mit vielen Rötelmäusen wahrscheinlicher machen (Imholt et al. 2015). Diese klimatischen Faktoren könnten künftig einen Anstieg der Puumala-Orthohantavirus-Infektionen bewirken. In Städten ist eine potenzielle Gefährdung durch Hantaviren in Schrebergärten (Lauben) und generell in Häusern mit Garten oder Parks gegeben (Essbauer et al. 2007). Auch die Extremereignisse wie Überschwemmungen können erhöhte humane Infektionsraten bewirken, da Oberflächenwasser durch Nagetierausscheidungen kontaminiert werden und die Nagetiere ihre natürlichen Lebensräume verlassen und in Häuser eindringen (Imholt et al. 2014); diese potenzielle Gefahr ist jedoch eher mit den Bakterien Leptospiren assoziiert.

Mit Ausnahme der Arbeit von Essbauer et al. (2007), die eine große Anzahl von PUUV-Infektionen in der Stadt Köln beschreibt, stammen die meist bekannten wissenschaftlichen Fakten über Hantaviren aus ländlichen Regionen, vor allem aus Waldgebieten. In Köln traten die Infektionen nahe des Stadtwaldes auf. Da große Mäusepopulationen auch in Städten, deren Parks und in ihren Randgebieten verbreitet sind, sind dort ebenfalls Infektionen mit Orthohantaviren möglich.

Weitere Informationen - Institutionen

a) RoBoPub-Zoonoseforschungsverbund (Rodent-Borne-Pathogens-and-Public-Health, d. h. Nagetierübertragene Krankheitserreger und öffentliche Gesundheit) ist ein interdisziplinäres Vorhaben zur Verbesserung der öffentlichen Gesundheit durch ein besseres Verständnis der Epidemiologie nagetierübertragener Krankheiten,

b) Das Netzwerk »Nagetier-assoziierte Pathogene« (NaÜPa-Net), um Daten zur Populationsdichte von Nagetieren, der Prävalenz der assoziierten pathogene und klimatischen Bedingungen in Deutschland zu sammeln,

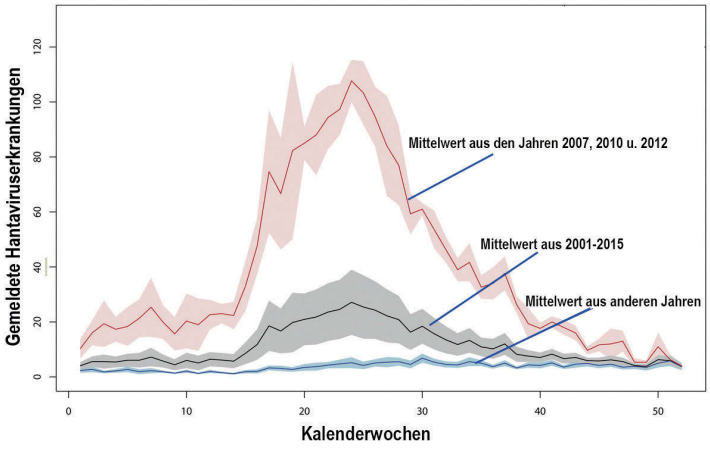


Abb. 4.6-4: Saisonale Verteilung der beim Robert-Koch Institut (RKI) gemeldeten Hantavirus-Erkrankungen. Das Maximum wird etwa zwischen Mai und Juli erreicht (aus Cunze et al. 2018 - verändert).

c) *https://www.fli.de/de/aktuelles/tierseuchengeschehen/hantavirus-erkrankungen/,*
d) *https://www.infektionsschutz.de/erregersteckbriefe/hantaviren/#c826,*
e) *www.rki.de/hantaviren* (Robert Koch-Institut). Hantavirusfälle unter SurvStat@RKI 2.0,
f) *www.fli.bund.de* (Friedrich-Loeffler-Institut),
g) *www.JKI.de* (Julius Kühn-Institut) und
h) Merkblatt (2019): Wie vermeide ich Hantavirusinfektionen? *https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00020232/Hantavirus-Informationsblatt_2019.pdf.*

Danksagung

Für die Korrekturen und wertvolle Anregungen zur Ergänzung des Manuskripts danken wir Dr. Daniela Reil sowie Dr. Christian Imholt aus dem Julius Kühn-Institut (JKI).

Literatur

CUNZE S., J. KOCHMANN, T. KUHN, R. FRANK, D. D. DÖRGE & S. KLIMPEL (2018): Spatial and temporal patterns of human Puumala virus (PUUV) infections in Germany. PeerJ 6: e4255. *https://doi.org/10.7717/peerj.4255.*

DREWES S., H. S. ALI, M. SAXENHOFER, U. M. ROSENFELD, F. BINDER, F. CUYPERS, M. SCHLEGEL, S. RÖHRS, G. HECKEL & R. G. ULRICH (2017): Host-associated absence of human Puumala virus infections in Northern and Eastern Germany. Emerging infectious diseases 23: 83-86.

ESSBAUER S. S., E. KRAUTKRÄMER (2015). Hantaviruses-Infections, Epidemiology and Hosts. Published in Zoonoses-Infections Affecting Humans & Animals; 2015, pp749-783.

ESSBAUER S. S., J. SCHMIDT-CHANASIT, E. L. MADEJA, W. WEGENER, R. FRIEDRICH, R. PETRAITYTE & F. J. CONRATHS (2007). Nephropathia epidemica in metropolitan area, Germany. Emerging infectious diseases, 13(8), 1271.

HEYMAN P., S. CEIANU, I. CHRISTOVA, N. TORDO, M. BEERSMA et al. (2011): A five-year perspective on the situation of haemorrhagic fever with renal syndrome and status of the hantavirus reservoirs in Europe, 2005-2010. Euro Surveill 16: pii: 19961.

HOLMES E. C. & Y. Z. ZHANG (2015): The evolution and emergence of hantaviruses. Curr Opin Virol 10: 27-33.

IMHOLT C., S. ESSBAUER, J. JACOB & R. G. ULRICH (2014): Klima, Nagetiere und Nagetier-assoziierte Krankheitserreger. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Auflage. Elektronische Veröffentlichung (Kap. 3.2.19) - *www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de.*

IMHOLT C., D. REIL, J. A. ECCARD, D. JACOB, N. HEMPELMANN & J. JACOB (2015): Quantifying the past and future impact of climate on outbreak patterns of bank voles (*Myodes glareolus*). Pest management science, 71(2), 166-172.

REIL D., U. M. ROSENFELD, C. IMHOLT, S. SCHMIDT, R. G. ULRICH, J. A. ECCARD & J. JACOB (2017): Puumala hantavirus infections in bank vole populations: host and virus dynamics in Central Europe. BMC ecology 17: 9.

REIL D. F. BINDER, J. FREISE, CHR. IMHOLT, K. BEYRER, J. JACOB, D. H. KRÜGER, J. HOFMANN, J. DREESMAN & R. G. ULRICH (2018): Hantaviren in Deutschland: Aktuelle Erkenntnisse zu Erreger, Reservoir, Verbreitung und Prognosemodellen. Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift. DOI 10.2376/0005-9366-18003.

Kontakt:
Dr. José L. Lozán
Universität Hamburg
Lozan@uni-hamburg.de
PD Dr. rer. nat. Sandra Eßbauer
Virologie & Rickettsiologie
Institut für Mikrobiologie der Bundeswehr, München
sandraessbauer@bundeswehr.org

Lozán, J. L. & S. Essbauer (2019): Hantavirus: Eine potentielle Gefahr als Folge der Erderwärmung? - Anmerkungen In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. 147-151. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.21.

4.7 Hitzewellen und Hitzewarnungen in Städten

Kathrin Graw, Stefan Muthers & Andreas Matzarakis

Stadtbewohner sind von Hitzewellen, die in Folge des Klimawandels häufiger, intensiver und länger auftreten, stärker betroffen als Bewohner auf dem Land. Die während des Tages aufgeheizten Gebäude in Städten kühlen nachts weniger stark aus als Gebäude im geringer verdichteten Umland. Dadurch wird das bereits beanspruchte Thermoregulationssystem des Körpers zusätzlich gefordert und nächtliche Ruhephasen werden verkürzt. Anhaltend hohe Temperaturen wirken auf diese Weise besonders belastend auf den menschlichen Körper. In Deutschland verstarben 2003 ca. 7.600 Menschen an den Folgen hitzebedingter Gesundheitsbelastung. Um auf bevorstehende Hitzewellen rechtzeitig reagieren zu können und Maßnahmen für den Gesundheitsschutz einzuleiten, hat sich das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes etabliert. Die besondere Belastung in Städten infolge des Effekts der Städtischen Wärmeinsel wird seit 2017 bei Hitzewarnungen besonders berücksichtigt. Untersuchungen in Berlin und Brandenburg haben ergeben, dass während der Hitzewelle 1994 die höchsten Abweichungen der Mortalität vom Erwartungswert in den am dichtesten bebauten Gebieten Berlins auftraten. Um zukünftig mit den intensiveren Hitzewellen umgehen zu können und Gesundheitsrisiken zu vermeiden, sollten daher insbesondere im städtischen Raum Anpassungsmaßnahmen entwickelt werden.

Heat waves and heat warnings in cities: *Urban dwellers are more affected by heat waves, which will occur more frequently, more intensively and will last longer as a result of climate change, than rural dwellers. The buildings in cities that are heated during the day cool down less at night than buildings in less densely populated areas. This places additional demands on the body's already stressed thermoregulation system and shortens rest periods at night. In this way, persistently high temperatures have a particularly stressful effect on the human body. In Germany, around 7600 people died in 2003 as a result of heat-related health problems. The heat warning system of the German Meteorological Service has established itself in order to be able to react in time to impending heat waves and to initiate measures for health protection. Since 2017, the specific heat stress in cities due to the Urban-Heat-Island effect has been given special consideration in heat warnings. Studies in Berlin and Brandenburg have revealed that during the heatwave in 1994 the highest deviation of mortality from the expected value occurred in the most densely built-up areas of Berlin. In order to be able to deal with the more intense heat waves in the future and to avoid health risks, adaptation measures should therefore be developed, especially in urban areas.*

Hitzewellen

Hitzewellen erhöhen Morbiditäts- und Mortalitätsraten, insbesondere von älteren Menschen über 75 Jahren mit Vorerkrankungen und Pflegebedürftigkeit. Bis Ende des 21. Jh. wird durch den Klimawandel eine Verdreifachung der Zahl der Hitzewellen in Deutschland erwartet (Muthers et al. 2017). Als Hitzewellen werden Perioden mit ungewöhnlich hohen Temperaturen und fehlender nächtlicher Abkühlung, die mehrere Tage andauern, bezeichnet. Die zu erreichende Höhe der Temperaturen und die Andauer unterscheidet sich je nach Anwendungsbereich und Untersuchungsregion.

Eine einheitliche Definition existiert nicht. Häufig wird ein Schwellenwert für die Temperatur und die minimale Dauer festgelegt, wobei absolute oder relative Schwellenwerte verwendet werden. Relative Schwellenwerte eignen sich besser für den Vergleich zwischen verschiedenen Ländern, da der Mensch an das lokale Klima angepasst ist.

Die gesundheitlichen Folgen von Hitzewellen sind in Sterbedaten für zahlreiche Länder nachgewiesen (Mora et al. 2017) und auch für Deutschland gut untersucht (Muthers et al, 2017, An der Heiden 2019). Im Sommer 2003, in dem eine Hitzewelle Anfang August große Teile West- und Mitteleuropas traf, wurden in Deutschland rund 7600 zusätzliche Todesfälle registriert (An der Heiden 2019). Nicht nur in den Mortalitätsdaten, auch in anderen Daten des Gesundheitssystems (Krankenhauseinweisungen, Notarzteinsätze, etc.) ist der negative Einfluss von Hitzewellen gut nachgewiesen (Ye et al. 2012).

Reaktionen des Körpers auf Hitze

Der menschliche Körper reagiert mit einer erhöhten Schweißproduktion auf hohe Temperaturen und sorgt auf diese Weise für Abkühlung. Durch den Flüssigkeitsverlust verliert der Körper Wasser, aber auch wichtige Mineralstoffe. Beides erhöht die Viskosität des Blutes und damit das Risiko für Thrombosen und andere Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Bei hohen Temperaturen weiten sich außerdem die Blutgefäße, um mehr Blut zur Abkühlung in die Körperperipherie zu leiten. Dadurch sinkt der Blutdruck.

Auch generell belastet die Hitze das Herz-Kreislauf-System und der Körper ist einem höheren Stress ausgesetzt, um die Körperkerntemperatur konstant zu halten. Dieser zusätzliche Stress kann zahlreiche bestehende Beschwerden verstärken, weswegen auch für andere Erkrankungen, wie etwa Erkrankungen der Atemwege, ein deutlicher Einfluss der Hitze nachgewiesen

ist (Koppe & Jendritzky 2008). Ist die Thermoregulation eingeschränkt, können Störungen des Wasser- und Elektrolythaushalts auftreten, die zu lebensbedrohlichen Beeinträchtigungen des Herz-Kreislauf-Systems führen können.

Risikofaktoren, die das Risiko hitzebedingter Gesundheitsschäden erhöhen

Ältere und morbide Menschen sind während Hitzewellen einem deutlich erhöhten Risiko ausgesetzt (Campbell 2018). Ältere Menschen schwitzen später und weniger als junge. Deshalb kann im Alter weniger Wärme über die Haut abgegeben werden (Herrmann 2019). Durch den Flüssigkeitsverlust und einen niedrigen Blutdruck nimmt bei Hitze auch die körperliche Belastbarkeit von älteren Menschen ab. Treppensteigen, das Aufstehen vom Stuhl oder das Halten des Gleichgewichts fallen schwerer und es steigt die Gefahr zu stürzen (Lindemann 2019).

Gesundheitlich vorbelastete Menschen, sind im Allgemeinen in ihrer Fähigkeit sich der Hitze anzupassen eingeschränkt und leiden dadurch stärker unter hohen Temperaturen als gesunde Menschen. Darüber hinaus kann bei starker Hitze auch eine Anpassung der Medikation notwendig sein. Werden beispielsweise Medikamente zur Absenkung des Blutdrucks eingenommen, sollte zu Beginn des Sommers mit dem Hausarzt oder Apotheker über eine Anpassung der Medikation bei Hitzewellen gesprochen werden (Herrmann 2019). Neben den genannten Personengruppen haben aber auch Kleinkinder und Säuglinge sowie mobilitätseingeschränkte Menschen ein erhöhtes Risiko unter Hitze zu leiden (Mangus & Canares 2019).

Das Gesundheitsrisiko von Hitzewellen ist aufgrund von intrinsischen Personen-spezifischen Charakteristika und extrinsischen Faktoren innerhalb der Bevölkerung ungleich verteilt (Milan & Creutzig 2015). Als intrinsische Risikofaktoren gelten Vorerkrankungen wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Chronische Lungenerkrankungen, Diabetes mellitus, Chronische Nierenerkrankungen, Neurologische Erkrankungen (z.B. M. Parkinson, Demenz), Psychiatrische Erkrankungen (verstärkt bei Medikamenteneinnahme und Betreuungsbedarf), Höhergradige Adipositas und Vorangehende Krankenhausaufenthalte. Auch das generelle Einnehmen von Medikamenten wie u.a. Diuretika oder Antipsychotika oder von Alkohol- und anderen Suchtmitteln gilt als Risikofaktor. Außerdem kann die Wohnsituation das Risiko erhöhen, wenn sich das Schlafzimmer unter dem Dach befindet oder es sich ganz um eine Dachwohnung handelt und es keinen Zugang zu kühlen Räumen gibt. Falsche Belüftungsgewohnheiten sowie ein Haus mit thermisch schlecht isolierter Bausubstanz erhöhen ebenfalls das Risiko unter Hitze zu leiden, insbesondere, wenn sich das Haus oder die Wohnung innerhalb einer Stadt oder eines Ballungsgebietes befindet (Herrmann 2019). Die räumlichen und sozioökonomischen Gegebenheiten zählen zu den extrinsischen Faktoren (Milan & Creutzig 2015). Ein bedeutender extrinsischer Faktor ist die stärkere Wärmebelastung in der Stadt in Folge des städtischen Wärmeinsel- Effekts.

UHI - Effekt

Der sogenannte *Urban Heat Island* – Effekt (städtischer Wärmeinsel- Effekt) beschreibt die vor allem nachts höheren Luft- und Oberflächentemperaturen in Städten im Vergleich zum ländlichen Umland. Die höheren Temperaturen entstehen durch die tagsüber aufgeheizten Gebäude, die ihre Wärme nachts wieder abgeben und somit die nächtliche Abkühlung reduzieren. Je größer die Stadt bzw. je größer der Gebäudeanteil und der Versiegelungsgrad in der Stadt ist, desto größer ist der *UHI*-Effekt. Ländliche Regionen erwärmen sich nicht so schnell, da Wasser-, Grünflächen oder auch Bäume mehr Wärme aufnehmen können als Baumaterialien wie Beton, Metall, Glas oder Ziegel. Um 1 Kg Wasser um 1 K zu erwärmen wird sehr viel mehr thermische Energie benötigt, als um 1 Kg Beton um 1 K zu erwärmen, da die spezifische Wärmekapazität von Wasser sehr viel höher ist als von Beton.

Neben der Modifizierung des Wärmehaushalts wird durch die stärkere Versiegelung innerhalb einer Stadt auch der Wasserhaushalt beeinflusst. Die Baustruktur, -höhe und Anordnung hat Auswirkungen auf die Belüftung der Stadt und die Materialeigenschaften auf die Reflexion der solaren Strahlung. Mehrfachreflexionen von kurzwelliger Strahlung zwischen den Gebäuden führen zu einer größeren Absorption kurzwelliger Strahlung. Die Luftverunreinigungen durch Verbrennungsprozesse wie Verkehr, Industrie, oder Hausbrand rufen außerdem eine größere atmosphärische Gegenstrahlung hervor und die größere Horizonteinengung in einer Stadt bewirkt gleichzeitig eine geringere effektive Ausstrahlung. Alle diese Merkmale einer Stadt modifizieren das lokale Klima und führen zur Ausprägung eines Stadtklimas, welches sich vom lokalen Klima in der ländlichen Umgebung unterscheidet (Matzarakis 2018).

Besonderes Risiko für Stadtbewohner

Hitzewellen sind aufgrund des *UHI*-Effektes für Stadtbewohner belastender als für Bewohner auf dem Land. Durch die Urbanisierung wächst neben dem demografischen Wandel auch aus diesem Grund der Anteil der Risikogruppe (Schuster 2017). In

Deutschland leben 77% der Bevölkerung in Städten oder Ballungsgebieten. Weltweit leben mehr als die Hälfte der Bevölkerung in städtischen Gebieten (Ramamurthy 2017).

Beispiele einzelner Städte

In Berlin und anderen großen Städten konnte gezeigt werden, dass die Mortalitätsraten während Hitzewellen ansteigen (Gabriel & Endlicher 2011). Beispielsweise in Frankfurt am Main stieg die Anzahl der Krankenhauseinweisungen an den Hitzewelle-Tagen im Juli 2015 (>32 °C für wenigstens 5 Tage in Folge) um 22%. Bei den hitzeassoziierten Einweisungen (Exsikkose, Synkope, unklares Fieber, Hitzeerschöpfung) betrug die Zunahme über 200% (Steul 2018). Für Berlin und Brandenburg konnte gezeigt werden, dass die Gesundheitsrisiken während der Hitzewellen, die zwischen 1990 und 2006 auftraten, für ältere Menschen in ländlichen und städtischen Gebieten erhöht waren, insbesondere aber, dass im Jahr 1994, in dem im Sommer die stärkste Hitzewelle des 17-jährigen Zeitraums auftrat, die größten Abweichungen der erwarteten Sterblichkeit in den am dichtesten bebauten Gebieten Berlins auftraten (*Abb. 4.7-1*) (Gabriel & Endlicher 2011). Ebenso wurden in Tschechien die höchsten Abweichungen der relativen Mortalität an heißen Tagen in den wärmsten Regionen Tschechiens beobachtet, wobei die wärmsten Regionen auch den am meisten urbanisierten Gebieten Tschechiens entsprechen (Urban 2016). Eine Studie von Ward (2016) hat die Oberflächentemperaturen während der europaweiten Hitzewelle im Juli 2006 in 70 europäischen Städten untersucht und festgestellt, dass Städte mit einem kühleren Klima und einer großen Anzahl von Grünflächen mehr von der Hitzewelle betroffen waren, da die kühleren nördlicheren europäischen Städte vulnerabler gegenüber Hitzewellen zu sein scheinen als die südlicheren europäischen Städte, die besser angepasst erscheinen. In der Megastadt New York wurden im Juli 2016, in dem 3 Hitzewellen auftraten, kontinuierlich meteorologische Daten mittels Wetterstationen und Innenraumsensoren aufgezeichnet. Während der Hitzewellen konnte ein *UHI*-Effekt von 10 °C festgestellt werden (Ramamurthy 2017).

Der *UHI*-Effekt deutscher Städte während der Hitzeperiode Ende Juli bis Anfang August 2018 betrug in München bis zu 8 °C, in Berlin bis zu 7 °C, in Freiburg und Hannover bis zu 6 °C sowie in Hamburg und Frankfurt bis zu 5 °C. Die Berechnung der Lufttemperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland erfolgte anhand der Differenz der täglichen Lufttemperaturminima zwischen den innerstädtischen DWD-Messstationen und den außerhalb der Städte gelegenen Stationen (an Flughäfen bzw. am Flugplatz in Freiburg). In *Abb. 4.7-2* sind die täglichen Minimum- und Maximumtemperaturen (T_{min} und T_{max}) im Zeitraum vom 18.07. – 16.08.2018

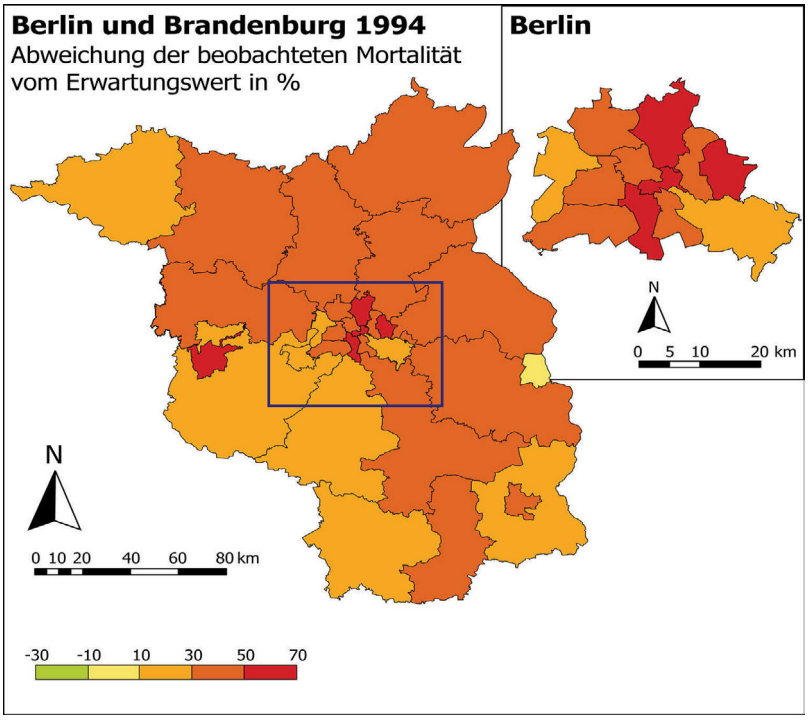


Abb. 4.7-1: *Während der Hitzewelle 1994 zeigten sich die größten positiven Abweichungen von der erwarteten Sterblichkeit in den am dichtesten besiedelten Gebieten Berlins und Brandenburgs (aus Gabriel & Endlicher 2011 mit freundlicher Genehmigung von Frau Gabriel).*

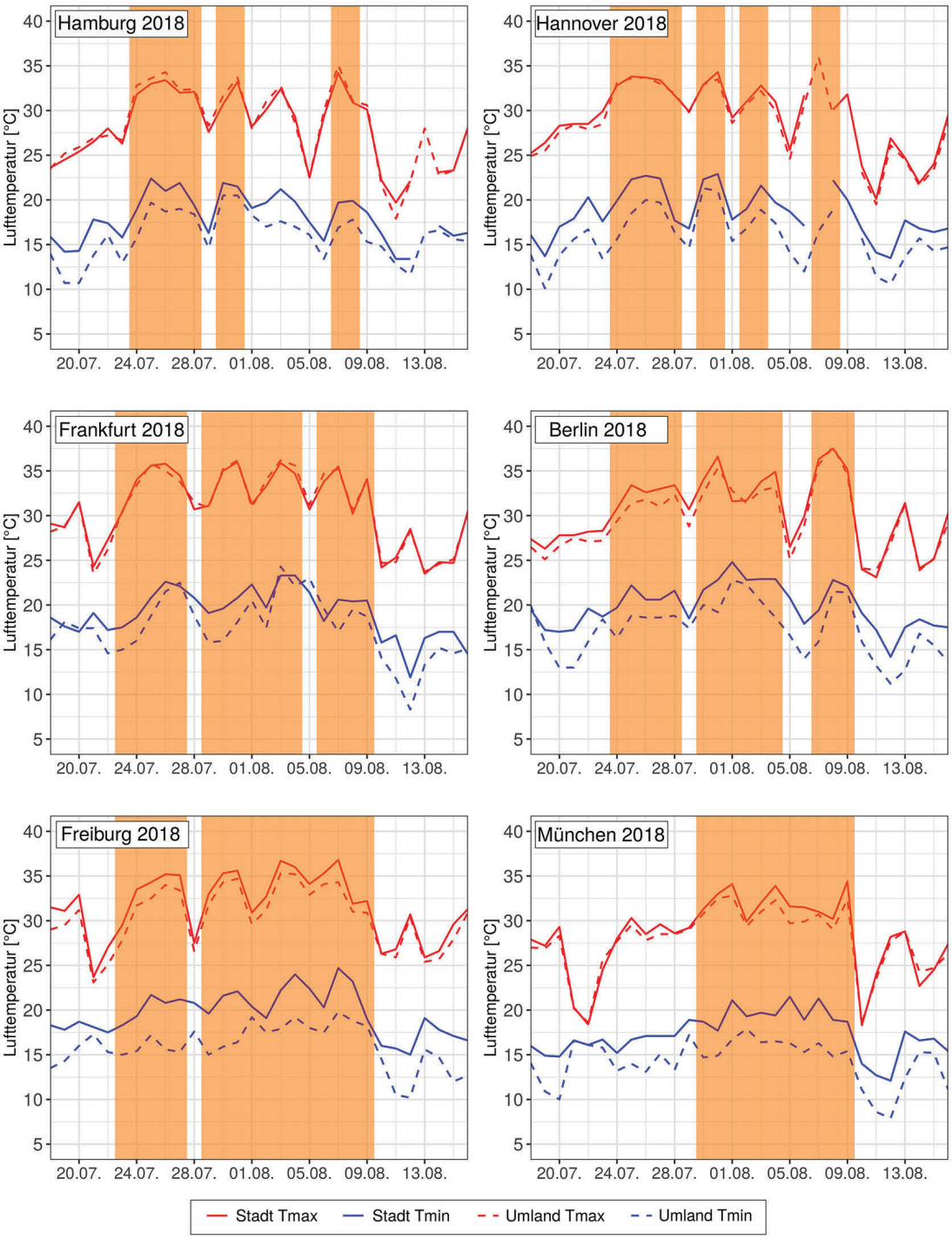


Abb. 4.7-2: *Tägliche Maximum- und Minimumtemperaturen (T_{max}, T_{min}) für verschiedene Städte Deutschlands sowie ihr Umland während der Hitzeperiode Ende Juli Anfang August 2018. Hitzewarnungen wurden vom DWD während der orange markierten Zeiträume herausgegeben.*

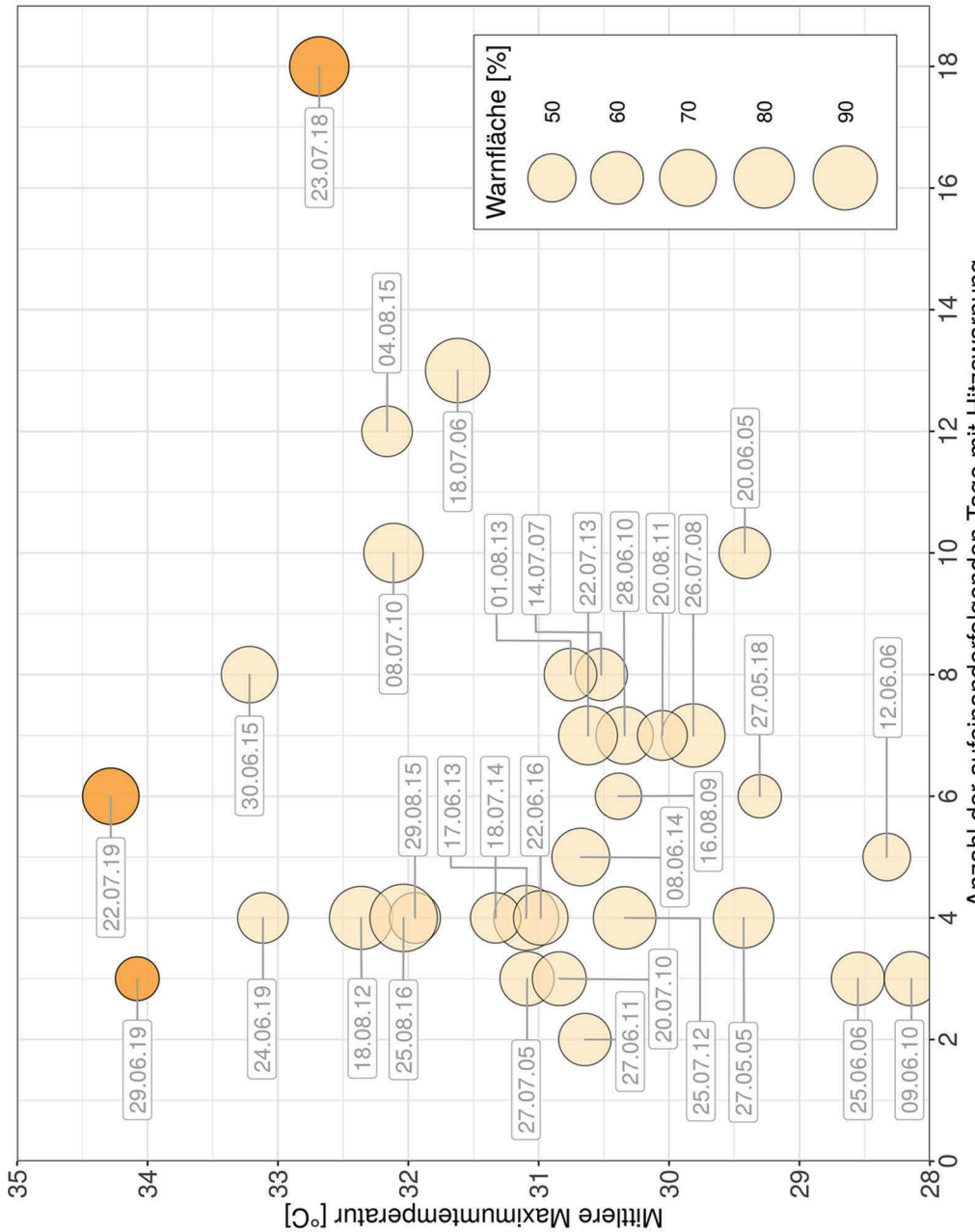


***Abb. 4.7-3**: Die größten Hitzewellen Deutschlands von 2005 bis 2019 mit einer betroffenen Fläche von mehr als 100.000 km² (33% des Bundesgebiets). Die Kreisfläche gibt die vom DWD bewarnte Fläche Deutschlands während einer Hitzewelle in % an. Das angegebene Datum entspricht dem Beginn der jeweiligen Hitzewelle. Die zwei heißesten und die längste Hitzewelle traten in den letzten Jahren (2018, 2019) auf (E-Obs v20.0e, Cornes et al. 2018).*

für die Städte Hamburg, Hannover, Berlin, Frankfurt, Freiburg und München sowie die zugehörigen T_{min} und T_{max} der Stationen außerhalb der Städte dargestellt. Der vor allem nachts auftretende *UHI*-Effekt ist besonders deutlich anhand der Minimumtemperaturen zu erkennen. Während sich die Maximumtemperaturen zwischen Stadt und Umland nur geringfügig unterscheiden, sind die Minimumtemperaturen im Umland durchgehend niedriger als die Minimumtemperaturen in den Städten.

Orange markierte Bereiche entsprechen Tagen an denen eine Hitzewarnung des DWD für den jeweiligen Warnkreis, in dem die Stadt liegt, herausgegeben wurde. Die Länge und Anzahl der Hitzewellen, die während der Hitzeperiode vom 23.07. – 09.08.2018 in Deutschland aufgetreten sind, variierte in den verschiedenen Städten. Beispielsweise waren Freiburg und München von den längsten Hitzewellen betroffen, während im Norden in Hamburg und Hannover vor allem kürzere Hitzewellen aufgetreten sind bzw. die gesamte Hitzeperiode öfter unterbrochen wurde als im Süden oder Osten Deutschlands. Eine Erklärung hierfür können die meist aus Nordwesten nach Deutschland einfließenden kühleren Luftmassen sein, die ihre abkühlende Wirkung nicht bis in den Süden aufrechterhalten konnten und sich auf dem Weg nach Süden bereits wieder erwärmt haben. Im Osten Deutschlands macht sich die stärkere kontinentale Prägung bemerkbar. Die höchste Maximumtemperatur wurde in der größten Stadt in Berlin mit über 37 °C am 08.08.2018 erreicht. Knapp darunter folgt das im warmen Oberrheingraben gelegene Freiburg. Neben den hohen Maximumtemperaturen sind außerdem Tropennächte, d.h. Nächte, in denen die Minimumtemperatur nicht unter 20 °C abkühlte, gut zu erkennen. Diese fallen häufig mit den herausgegebenen Hitzewarnungen zusammen, da ein Kriterium für die Herausgabe von Hitzewarnungen eine fehlende nächtliche Abkühlung ist.

Hitzewarnungen des Deutschen Wetterdienstes

Hitzewarnungen werden seit 2005 zum Schutz der Bevölkerung in Deutschland vom Deutschen Wetterdienst (DWD) operativ herausgegeben. Basis ist ein Energiebilanzmodel des Menschen mit dem die Gefühlte Temperatur berechnet wird. Kombiniert wird das Modell mit einem Gebäudesimulationsmodell zur Abschätzung der Wärmebelastung in Innenräumen (Pfafferott & Becker 2005). Eine Hitzewarnung der Stufe I wird herausgegeben, wenn der Schwellenwert zu starker Wärmebelastung um 12 UTC an mindestens 2 Tagen in Folge überschritten wird und eine ausreichende nächtliche Abkühlung der Wohnräume nicht mehr gewährleistet ist. Die Schwelle zur starken Wärmebelastung liegt bei etwa 32 °C Gefühlter Temperatur, kann aber im Verlauf des Sommers aufgrund der Anpassung des Menschen variieren und leicht darunter oder darüber liegen. Die Berechnung des variablen Schwellenwertes erfolgt mit Hilfe des HeRATE-Verfahrens (Koppe 2005). Mit einer Gefühlten Temperatur von 34 °C erreicht der variable Schwellenwert zu starker Wärmebelastung seine obere Grenze und kann nicht weiter ansteigen. Eine Hitzewarnung der Stufe II wird herausgegeben, wenn der Schwellenwert zu extremer Wärmebelastung überschritten wird. Eine extreme Wärmebelastung erfolgt ab einer Gefühlten Temperatur von 38 °C bzw. bei älteren Menschen aufgrund ihrer geringeren Fähigkeit zur Anpassung an die Hitze bereits ab 36 °C Gefühlter Temperatur.

Um die verstärkte Wärmebelastung in Städten zu berücksichtigen, wird seit 2017 auch der *UHI*-Effekt für alle Städte Deutschlands mit mehr als 100.000 Einwohnern im Hitzewarnsystem berücksichtigt. Über einen statistischen Ansatz nach Wienert et al (2013) wird der Temperaturvorhersage für die kommenden Tage der *UHI*-Effekt hinzugefügt. Der *UHI*-Effekt ist dabei eine Funktion der Größe der Stadt (Parametrisiert über die Einwohnerzahl), der 24 stündigen Vorgeschichte der Gesamtbedeckung und der Windgeschwindigkeit sowie dem Tag des Jahres und der Zeit. Auf Basis dieser modifizierten Vorhersage wird dann erneut eine Innenraumtemperatur berechnet, die die nächtliche Wärmebelastung in städtischen Innenräumen beschreibt.

Ein Vergleich der in Deutschland seit Einführung des Hitzewarnsystems im Jahr 2005 aufgetretenen Hitzewellen hinsichtlich Intensität, Andauer und betroffener Fläche ist in *Abb. 4.7-3* dargestellt. Jeder Kreis in der Abbildung entspricht einer Hitzewelle. Die Größe der Kreise beschreibt die betroffene Fläche. Jeder Kreis ist mit dem Startdatum der Hitzewelle gekennzeichnet. Anhand der Lage auf dem Diagramm ist die Dauer der Hitzewelle bzw. die Anzahl der aufeinanderfolgenden Tage mit Hitzewarnung sowie die mittlere Maximumtemperatur jeder Hitzewelle abzulesen. Die Maximumtemperaturen wurden auf Basis des E-OBS Datensatzes über die von der Hitzewelle betroffenen DWD Warnkreise berechnet (E-Obs v20.0e, Cornes et al. 2018). Zu erkennen ist, dass insbesondere die letzten Jahre durch deutliche Extreme hervorstechen. Im Sommer 2019 trafen zwei der bislang heißesten Hitzewellen auf. Auch im Sommer 2015 kam es zu einer besonders heißen mehrtägigen Hitzewelle Ende Juni. Hinsichtlich der Andauer sticht der Sommer 2018 deutlich hervor, in dem mit einer Dauer von 18 Tagen die mit Abstand längste Hitzewelle seit dem Jahr 2005 in Deutschland auftrat.

Ausblick

Sechs der elf stärksten Hitzewellen im Zeitraum 1950-2015 traten in den Jahren nach 2000 auf (Russo et al. 2015). Um die gesundheitlichen Folgen einer Hitzewelle zu reduzieren sind Anpassungsmaßnahmen notwendig. Mit dem Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienst, dass frühzeitig auf eine Gefahrensituation aufmerksam macht, wurde eine Anpassungsmaßnahme im Jahr 2005 umgesetzt. Die heißesten (2015 und 2019) und längsten (2018) Hitzewellen seit 2005 traten dabei in den letzten Jahren auf. Mit dem fortschreitenden Klimawandel ist eine weitere Zunahme von Hitzewellen sehr wahrscheinlich (Muthers at al. 2017).

Literatur

AN DER HEIDEN M., S. MUTHERS, H. NIEMANN, U. BUCHHOLZ, L. GRABENHENRICH & A. MATZARAKIS (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz, Ausgabe 5/2019.

CAMPBELL S., T. A. REMENYI, C. J. WHITE & F. H. JOHNSTON (2018): Heatwave and health impact research: A global review. Health & Place, Vol. 53, P. 210-218.

CORNES R., G. VAN DER SCHRIER, E. J. M. VAN DEN BESSELAAR & P. D. JONES (2018): An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets. J. Geophys. Res. Atmos., 123. doi:10.1029/2017JD028200.

GABRIEL K. M. A. & W. R. ENDLICHER (2011): Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. Environmental Pollution, Vol 159, Issues 8-9, Pages 2044-2050, ISSN 0269-7491. *https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.016. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749111000388.*

HERRMANN A.,·W. E. HAEFELI U. LINDEMANN K. RAPP P. ROIGK & C. BECKER (2019): Epidemiologie und Prävention hitzebedingter Gesundheitsschäden älterer Menschen. Z Gerontol Geriat, 52, 487. *https://doi.org/10.1007/s00391-019-01594-4.*

KOPPE C. (2005): Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse, Dissertation.

KOPPE C. & G. JENDRITZKY (2008): Die Auswirkungen von thermischen Belastungen auf die Mortalität. In: Lozán J. L., H. Grassl, G. Jendritzky, L. Karbe & K. Reise (Hrsg) Warnsignal Klima. Gesundheitsrisiken/ Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Wiss. Auswertungen. *https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2014/03/koppe_jendritzky.pdf*

LINDEMANN U., C. BECKER & P. ROIGK (2019): Alter + Hitze: Tipps für ältere Menschen RBK (Robert Bosch Krankenhaus) – Broschüre, gefördert vom Bundesministerium für Gesundheit.

MANGUS C. W. & T. L. CANARES (2019): Heat-Related Illness in Children in an Era of Extreme Temperatures. Pediatrics in Review, 40, 3.

MATZARAKIS A. (2018): Das Stadtklima – Herausforderung heute und für die Zukunft. Der Architekt 5/18.

MORA C., B. DOUSSET, I. R. CALDWELL, F. E. POWELL, R. C. GERONIMO, C. R. BIELECKI, C. W. W. COUNSELL, B. S. DIETRICH, E. T. JOHNSTON, L. V. LOUIS et al. (2017): Global risk of deadly heat. Nat. Clim. Chang. 7, 501-506.

MUTHERS S., G. LASCHEWSKI & A. MATZARAKIS (2017): A comparison of the summer 2003 and 2015 with a particular focus on health impacts in South-West Germany. Atmosphere, 8(11), 224; doi: 10.3390/atmos8110224.

MILAN B. F. & F. CREUTZIG (2015): Reducing urban heat wave risk in the 21st century. Environmental Sustainability, 14: 221-231.

PFAFFEROTT J. & P. BECKER (2008): Erweiterung des Hitzewarnsystems um die Vorhersage der Wärmebelastung in Innenräumen, Bauphysik 30(4):237-243. doi: 10.1002/bapi.200810031.

RAMAMURTHY P., J. GONZÁLEZ, L. ORTIZ, M. AREND & F. MOSHARY (2017) Impact of heatwave on a megacity: an observational analysis of New York City during July 2016.

RUSSO S, J. SILLMANN & E. M. FISCHER (2015): Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. Environ Res Lett 10:124003.

SCHUSTER C., J. HONOLD, S. LAUF & T. LAKES (2017): Urban heat stress: novel survey suggests health and fitness as future avenue for research and adaption strategies. Environ. Res. Lett. 12.

STEUL K. S., L. LATASCH, H. G. JUNG & U. HEUDORF (2018): Morbidität durch Hitze – eine Analyse der Krankenhauseinweisungen per Rettungseinsatz während einer Hitzewelle 2015 in Frankfurt/Main. Gesundheitswesen 80:353–359; Erratum: Morbidität durch Hitze – eine Analyse der Krankenhauseinweisungen per Rettungseinsatz während einer Hitzewelle 2015 in Frankfurt/Main Gesundheitswesen 2018; 80(08/09): 767-767. doi: 10.1055/a-0658-2816.

URBAN A., K. BURKART, J. KYSELÝ, C. SCHUSTER, E. PLAVCOVÁ, H. HANZLÍKOVÁ, P. ŠTĚPÁNEK & T. LAKES (2016): Spatial Patterns of Heat-Related Cardiovascular Mortality in the Czech Republic. IJERPH. doi: 10.3390/ijerph13030284.

WARD K., S. LAUF, B. KLEINSCHMIT & W. ENDLICHER (2016): Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. Sci Total Environ., 1, 569-570:527-539. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.119.

WIENERT U., F. KREIENKAMP, A. SPEKAT & W. ENKE (2013): A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behaviour of buildings. Meteorologische Zeitschrift 22, 2, 179–85. doi:10.1127/0941-2948/2013/0397.

YE X., W. RODNEY, Y. WEIWEI, P. VANECKOVA, X. PAN & S. TONG (2012): Ambient Temperature and Morbidity: A Review of Epidemiological Evidence. Environmental Health Perspectives 120, Nr. 1, 19-28. *https://doi.org/10.1289/ehp.1003198.*

Kontakt:

Kathrin Graw
Dr. Stefan Muthers
Prof. Dr. Andreas Matzarakis
Deutscher Wetterdienst DWD-Freiburg im Breisgau
andreas.matzarakis@dwd.de

Graw K., S. Muthers & A. Matzarakis (2019): Hitzewellen und Hitzewarnungen in Städten. In: Lozán, J. L. S.-W. Breckle, H. Graßl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 152-158. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.22.

5. VERÄNDERUNGEN STÄDTISCHER ÖKOSYSTEME

In diesem Teil des Buches werden unterschiedliche Aspekte des Ökosystems Stadt beleuchtet. Da Städte in den vergangenen Jahrzehnten weltweit mehr geworden und gewachsen sind und auch weiter wachsen werden, wird das Ökosystem Stadt immer bedeutender. In Städten finden wir nicht nur andere Temperatur-, Wind-, Niederschlags- und Luftfeuchtigkeitswerte als im Umland, sondern oft auch erhöhte Spurengaskonzentrationen. Ihre Deposition kann empfindliche Arten behindern und andere, wie nitrophile (mehr Stickstoffdünger benötigende) oder wärmeliebende fördern. Dies betrifft nicht nur die Vegetationsformationen auf dem Land, sondern auch die Gewässer. Wie die Pflanzen auf das Stadtklima reagieren, wird in Kap. 5.1 behandelt. Kap. 5.2 geht auf fremde Arten in der Stadt ein. Am Beispiel des Stadt Frankfurt werden im Kap. 5.3 die Veränderungen von Flora und Fauna der letzten zwei Jahrhunderte beschrieben. Veränderungen in städtischen Gewässern beschreibt Kap. 5.4. Mit der Zunahme der Bevölkerung und durch den Klimawandel wird das Wasser in Städten knapp (Kap. 5.5). Das Phänomen Landflucht und die Entstehung von Megastädten steht in Kap. 5.6 im Mittelpunkt.

5.1 Pflanzenreaktionen auf das Stadtklima

KATHARINA SCHMIDT & HANS-HELMUT POPPENDIECK

Die Umweltbedingungen für Pflanzen in Städten sind vor allem durch erhöhte Temperaturen (städtische Wärmeinsel), einem hohem Versiegelungsgrad, hohem Störungsgrad und hoher Dynamik geprägt. Das Stadtklima wirkt sich auf die Phänologie vieler Arten aus, die in Städten z.B. früher blühen als im Umland, außerdem werden wärmeliebende Arten häufig gefördert. Eine weitere Reaktion sind Arealverschiebungen, z.B. des Schilfrohrs und immergrüner Gehölze. Evolutionäre Prozesse können in urbanen Räumen beschleunigt werden. Urbane Floren können sich in Richtung erhöhter Anteile wärmeliebender Neophyten verschieben. Die spontane Stadtflora kann gut auf Veränderungen reagieren und sich anpassen, sie wird aber zurückgedrängt, daher muss gepflanzte Stadtvegetation wohl durchdacht sein. Einflüsse auf die Vegetation durch den Klimawandel sind von denen der Urbanisierung oftmals schwer zu trennen.

Plant reactions to the urban climate: *Environmental conditions for plants in urban areas are characterised by higher temperatures (urban heat island), high degrees of soil sealing, disturbance as well as by a highly dynamic environment. Urban climate affects the phenology of several plant species and often favours thermophilic species. Furthermore, plant species' ranges can shift as a reaction to urban climate. In urban areas evolutionary processes can be accelerated and urban floras harbour more and more thermophilic non-native species. The spontanously occuring flora is able to adapt to changes, but it is threatened by human activities. Therefore, planted vegetation has to be thoroughly planned. Effects on vegetation by climate change and urbanisation are often difficult to distinguish.*



Der Kompass-Lattich *Lactuca serriola* auf einem innerstädtischen Standort in Hamburg (eine wärmeliebende Pflanze) Foto: H. H. Poppendieck.

Das Stadtklima ist gegenüber dem Umland durch die erhöhte Temperatur gekennzeichnet. Der Temperaturgradient der städtischen Wärmeinsel wird vielfach als Modell herangezogen, um die Folgen der für die Zukunft prognostizierten Klimaerwärmung abzuschätzen (*space-for-time substitution*). Die einzelne Pflanze, beispielsweise der Straßenbaum, reagiert auf die stadtklimatischen Witterungsereignisse unter anderem durch Verschiebung der phänologischen Phasen, teilweise durch Wachstumsförderung, aber auch durch Trockenstress. Populationen wildlebender Pflanzen reagieren durch Arealverschiebungen, aber auch die genetische Variation phänotypischer und physiologischer Merkmale ist nachgewiesen worden. Die städtische Flora ist gekennzeichnet durch einen hohen Anteil an wärmeliebenden Arten, darunter überproportional viele Neophyten mit speziellen Anpassungen an warmtrockene Standorte. Es ist jedoch vielfach schwierig, bei der Interpretation der städtischen Pflanzenvorkommen eindeutig zwischen den Einflüssen des Klimas und der Urbanisierung zu unterscheiden (Gregor et al. 2012).

Die städtische Wärmeinsel

Das Verhalten von Tier- und Pflanzenarten und deren Populationen in der Stadt ist aufschlussreich, weil sie in ihrem Lebenslauf physikalische Größen wie Temperatur, Niederschlagsmenge und Luftfeuchte »integrieren« und nicht auf Mittelwerte sondern vielmehr reale Ereignisse wie die Schwankungen der Witterung reagieren (Reichholf 2007). Das Areal der städtischen Wärmeinsel ist korreliert mit dem Versiegelungsgrad und der Geschosshöhe der städtischen Bebauung. Den Kern bildet die innere eu-urbane bzw. meta-hemerobe (naturfremde) Zone, die durch einen hohen Versiegelungsgrad und hohe Bauwerke gekennzeichnet ist und nahezu vegetationsfreie Industrieanlagen mit einschließt. Hier wirken stadttypische Umweltbedingungen wie beispielsweise hohe Temperaturen am stärksten auf die Vegetation ein, deren Flächenanteil allerdings gerade in diesem Bereich sehr gering ist und in vielen Städten (Hamburg, Lübeck, Berlin) durch innere Verdichtung weiter abnimmt. In der anschließenden suburbanen Zone mit offener Bebauung und hohem Grünanteil ist der städtische Einfluss einschließlich der Temperaturerhöhung deutlich weniger ausgeprägt, aber dennoch spürbar. Auch außerhalb dieses Bereiches beginnen sich in der landwirtschaftlich geprägten Kulturlandschaft urbane Inseln mit urbanem Kleinklima zu entwickeln (»Intercity«, Brandes 2010), etwa in größeren Industrieansiedlungen oder Logistikzentren auf der grünen Wiese.

Städtische Ökosysteme und ihre Umweltbedingungen für Pflanzen

Umweltbedingungen: Die Umweltbedingungen für Pflanzen in Städten sind stark durch den menschlichen Einfluss geprägt. Die im Vergleich zum ländlichen Umland sehr hohen Bevölkerungsdichten führen zu stark versiegelten Böden und einem hohen Grad an Störung, Verkehr, erhöhter Luft- und Bodenverschmutzung sowie einem hohen Stickstoffeintrag und einer schlechten Wasserverfügbarkeit (McKinney 2002). Temperatur und Niederschlag unterscheiden sich stark von denen ländlicher Räume (Städtische Wärmeinsel, s.o.). Bauvorhaben, Garten- und Landschaftsbau und Freizeit- und Erholungsaktivitäten üben hohen Druck auf die Vegetation aus (Rebele 1994). Lokal kommen Einflüsse wie Tritt, Mahd und Hundeauslauf hinzu. Städtische Böden sind sehr heterogen und eher trocken, daher ist Wasser für die Vegetation in der Regel nur sehr kurzzeitig verfügbar. Auch das Vorkommen von Bestäubern und Fraßfeinden hat einen Effekt auf das Pflanzenwachstum und -vorkommen in Städten, wobei in hoch verdichteten Bereichen naturgemäß weniger Insekten vorkommen als in grünen suburbanen Gebieten. Die genannten Umweltbedingungen nehmen entlang eines Stadt-Land-Gradienten in ihrer Intensität ab, dabei nimmt der Anteil naturnaher und natürlicher Lebensräume mit abnehmender Urbanisierung zu.

Vier Arten der Natur: Die städtische Natur setzt sich aus verschiedenen »Naturen« zusammen, die sich kleinräumig abwechseln. Die Natur in Städten kann nach Kowariks Konzept der »vier Naturen« (Kowarik 1992) in vier Gruppen nach ihren Ursprüngen eingeordnet werden. »Natur der ersten Art« sind Relikte ursprünglicher Natur, die vom Menschen unbeeinflusst waren, heute jedoch auch stark modifiziert sind, z.B. Wälder, Moore und Gewässer. »Natur der zweiten Art« sind Relikte ruraler Kulturlandschaften, die durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt sind, z.B. Grünland, Feldmarken, gärtnerische Flächen oder Knickrelikte. »Natur der dritten Art« ist die gärtnerisch gestaltete und gepflegte Stadtnatur, z.B. Parks, Gärten oder Gründächer. »Natur der vierten Art« umfasst die spontane urbane Natur, die sich z.B. auf urban-industriellen Flächen wie Brachflächen, Verkehrsflächen und industriellen Flächen ansiedelt. In diesem Artikel werden primär die beiden letzten, für den innerstädtischen Bereich prägenden Typen berücksichtigt.

Störung, Dynamik und Kleinteiligkeit: Neben der hohen kleinskaligen Struktur- und Lebensraumvielfalt ist die regelmäßige anthropogene Störung ein wichtiger Faktor, der urbane Gebiete zu sehr dynamischen Lebensräumen macht. Auch die starke Variabilität dieser Lebensräume und der unterschiedliche Grad an anthropogener Störung sind Faktoren, die die Lebensraumvielfalt und damit die Artenvielfalt begünstigen (Pysek 1993, Zerbe et al. 2003).

Artenreichtum: Die pflanzliche Artenvielfalt nimmt mit zunehmender Stadtgröße und Anzahl Einwohner zu (Pyšek 1993). Dieser Artenreichtum ist in der Regel höher als in den umliegenden ländlichen Gebieten. Neben der bereits genannten Vielfalt an Lebensräumen wurden Städte oft in Gebieten mit hoher geologischer Vielfalt gegründet, die sich auch positiv auf den pflanzlichen Artenreichtum auswirkt (Kühn et al. 2004). Auch neu eingewanderte Arten (Neophyten) tragen zur hohen städtischen Artenvielfalt bei: Städte sind Handels- und Verkehrszentren, in denen neue Arten häufig als erstes auftreten. Viele Arten haben z.B. als Samen in transportierter Wolle oder im Ballastwasser von Schiffen entfernt liegende Städte erreichen können. Innerhalb von Städten ist der Pflanzenartenreichtum häufig in suburbanen Bereichen am höchsten (McKinney 2008). Innerstädtische Gebiete weisen einen hohen Versiegelungsgrad und eine hohe Bebauungsdichte auf, so dass generell weniger Platz für grüne Flächen bleibt. In äußeren Stadtgebieten nehmen (eher monotone) Landwirtschaftsflächen oder auch Wälder bzw. andere großflächige Lebensräume häufig bereits viel Raum ein. Daher gibt es weniger Lebensraumdiversität und dementsprechend auch weniger Pflanzenartenvielfalt.

Auswirkungen von Vegetation auf das Stadtklima: Stadtklima und Vegetation bedingen sich natürlich auch gegenseitig. Im Sommer kann Vegetation einen positiven Effekt auf das Stadtklima haben und dazu beitragen, Temperaturen zu senken, da sie eine geringere Wärmespeicherkapazität als Gebäude und versiegelte Flächen hat, auch Verdunstung (Evapotranspiration) trägt zur Kühlung bei (Oke 1982, Lindberg & Grimmond 2011). Vor allem Stadtbäume können lokal durch Beschattung und Verdunstung dazu beitragen, dass es sich auch an Hitzetagen in Städten aushalten lässt. Aber auch krautige Vegetation oder Rasenflächen kühlen das Stadtklima merklich ab und können gegenüber der Bebauung eine ausgleichende Wirkung haben. Dieser Kühlungseffekt kann sich vor allem in Hinblick auf den Klimawandel positiv für die menschliche Bevölkerung in Städten auswirken, die dadurch weniger stark von Hitzewellen betroffen sein kann.

Reaktionen der Pflanzen auf das Stadtklima

Hier muss unterschieden werden zwischen der spontanen Vegetation und der gepflanzten Vegetation (z.B. Straßenbäume), bei der Ausbreitung, Etablierung und Auswahl des Standortes durch menschliche Aktivitäten erfolgt.

Verhalten der einzelnen Pflanze

Das städtische Klima ist in der Regel wärmer als das im ländlichen Umland, zudem gibt es weniger Frosttage. Dadurch ist die Vegetationsperiode, also die Zeit, in der Pflanzenwachstum, Blüte und Fruchtentwicklung erfolgen kann, länger als im Umland. In Städten blühen Pflanzen demnach in der Regel früher (Roetzer et al. 2000). In ihrer Studie betrachteten Roetzer et al. den Blühbeginn der Arten Schneeglöckchen (*Galanthus nivalis*), Forsythie (*Forsythia* sp.), Vogelkirsche (*Prunus avium*) und Apfel (*Malus domestica*) in zehn verschiedenen europäischen Großstädten und ihrem Umland über mehr als 30 Jahre und stellten für alle Arten in allen Städten (mit einer Ausnahme) einen früheren Blühbeginn im urbanen Raum fest. Die längere Vegetationsperiode kann sich positiv auf Wuchs, Fortpflanzung und Samenproduktion auswirken, da eine vergleichsweise längere Zeit dafür zur Verfügung steht. Das Stadtklima kann sich auch positiv auf nicht-heimische Arten, die eine niedrigere Frosttoleranz als heimische Arten haben, auswirken. Diese Arten können sich häufig in Städten eher etablieren als im ländlichen Raum.

Das wärmere Stadtklima kann zudem auch die Interaktion zwischen Pflanzen und ihren Bestäubern beeinflussen und sich je nach physiologischer Toleranz auf die Phänologie von Pflanzen und Bestäuber auswirken. Verschiebungen in der Phänologie von Pflanzenarten in Städten hin zu einem früheren Blühzeitpunkt können verschiedene Auswirkungen haben (Jochner & Menzel 2015). Viele Pflanzenarten sind für ihre Bestäubung auf Insekten angewiesen, diese wiederum sind wichtige Nahrung für Vögel. Wenn sich Blühzeitpunkte verschieben und sich die verschiedenen Artengruppen in ihrer Aktivität zeitlich nicht mehr überlappen, z.B. vor dem Hinblick einer Verschärfung der Situation durch den Klimawandel, kann das Auswirkungen auf das gesamte Ökosystem und Nahrungsnetz haben. Gerade spezialisierte Pflanzenarten können möglicherweise schlechter oder gar nicht mehr bestäubt werden und demnach auch nur weniger oder sogar gar keine Samen bilden. Städte bieten gute Studienbedingungen für diese Zusammenhänge (Harrison & Winfree 2015).

Phänologische Studien sind Langzeitexperimente, in Hamburg wird bereits seit 1945 der Beginn der Forsythienblüte an der Lombardsbrücke für den Deutschen Wetterdienst beobachtet (DWD 2019) und schon 1955 wurde im Hamburger Abendblatt aufgerufen, im Rahmen einer »Citizen Science«-Aktion den Blühbeginn der Forsythie in ganz Hamburg zu melden (Franzen 1955).

Die phänologischen Abläufe zum Ende der Vegetationsperiode im Herbst sind weniger gut bekannt als die des Frühjahrs, was vor allem methodische Gründe hat. Fruchtreife und Blattfall ziehen sich über längere Zeiträume hin und sind daher schwieriger zu erfassen als Knospenaufbruch oder Blühbeginn, die viel exakter

getaktet sind. Das ist insofern bedauerlich, da der Zeitpunkt des Blattfalls und des Fruchtens sowie die Menge und Qualität der Früchte für den Fortpflanzungserfolg und für die Konkurrenzkraft der Arten entscheidend sind. Gallinat et al. (2015) machen Vorschläge für zukünftige Forschungsvorhaben auf diesem Gebiet.

Auch Ökosystemfunktionen, die dem Menschen nutzen, können durch Veränderungen in der Phänologie beeinträchtigt werden, z.B. bei der Lebensmittelproduktion in Städten durch Frostschäden bei früheren Blühzeiten oder durch Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit durch einen früher beginnenden und länger andauernden Pollenflug.

Charakteristische Merkmale für Arten, die gut mit den urbanen Bedingungen klar kommen, sind Windbestäubung, Zoochorie sowie mesomorphe, skleromorphe oder sukkulente Blättern und ein ein- oder zweijähriger Lebenszyklus (Knapp et al. 2008). Gerade die Blattmerkmale weisen auf eine gute Anpassung an trockene und warme Lebensräume hin.

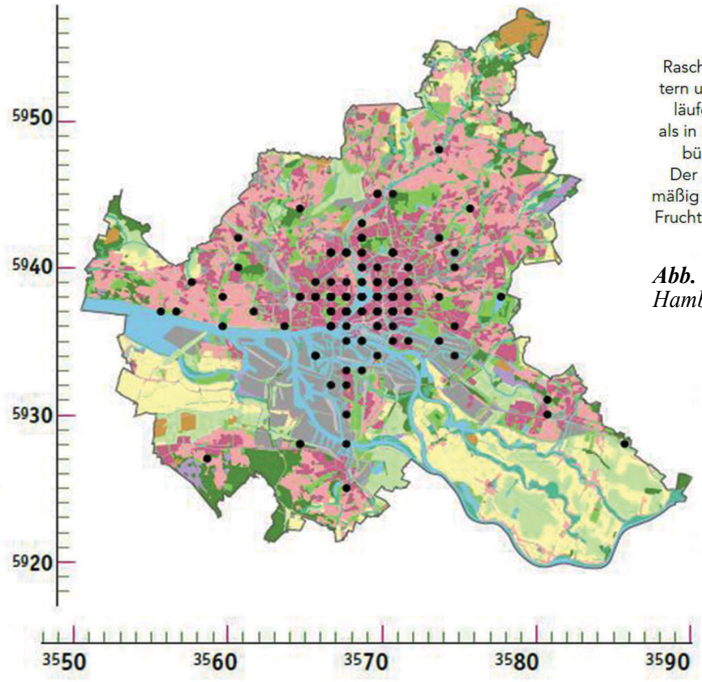
Stadtbäume – Beispiel für gepflanzte Vegetation in der Stadt

Erhöhte Temperatur, CO_2-Konzentration und Stickstoffeinträge fördern im Allgemeinen das Wachstum der Bäume, wie Pretzsch et al. (2017) in einem weltweiten Vergleich feststellten. Dies gilt jedoch nicht für urbane Bedingungen in gemäßigten Breiten. Insbesondere Straßenbäume stehen hier in Innenstädten durch Bodenverdichtung, Trockenheit und mangelndem Wurzelraum unter starkem Stress, was zu Wachstumsproblemen und verstärktem Schädlingsbefall führen kann. Da sich im Zuge des Klimawandels der Stress erhöhen dürfte, wurde mit Hilfe einer »KlimaArtenMatrix« für Deutschland eine Liste besonders widerstandsfähiger »Klimabäume« für innerstädtische Standorte vorgelegt (Schönfeld 2018). Besonderes Augenmerk muss aber auf den Schutz von Altbäumen gelegt werden, da Neuanpflanzungen ihre Ausmaße nicht mehr erreichen werden (Dickhaut & Eschenbach 2019).

Stadtklima und städtische Pflanzenareale

Die städtischen Areale wärmeliebender Gefäßpflanzen zeigen vielfach eine hohe Korrelation mit dem Areal der städtischen Wärmeinsel. Das kann im Zusammenhang mit ihren biologischen Eigenschaften interpretiert werden. Beispielsweise fördert das frostarme Innenstadtklima den Götterbaum *Ailanthus altissima (Abb. 5.1-1*) der nur über eine geringe Frosttoleranz verfügt (Kowarik & Säumel 2007). Signifikant ist auch das verstärkte Vorkommen von an aride Verhältnisse angepassten neophytischen C4-Pflanzen innerhalb der städtischen Wärmeinsel, unter denen sich viele Gräser (z.B. Hühnerhirse) und Fuchsschwanzgewächse befinden (z.B. Melden und Amaranth-Arten) (Tamis et al. 2005).

***Schilfrohr* (Phragmites australis)** - Seit 2014 hat sich in Hamburg das Schilfrohr *Phragmites australis* zunehmend in Pflasterfugen am Rande innerstädtischer Straßenzüge angesiedelt (Poppendieck 2016). Die neuen und auf den ersten Blick trockenen Stand-

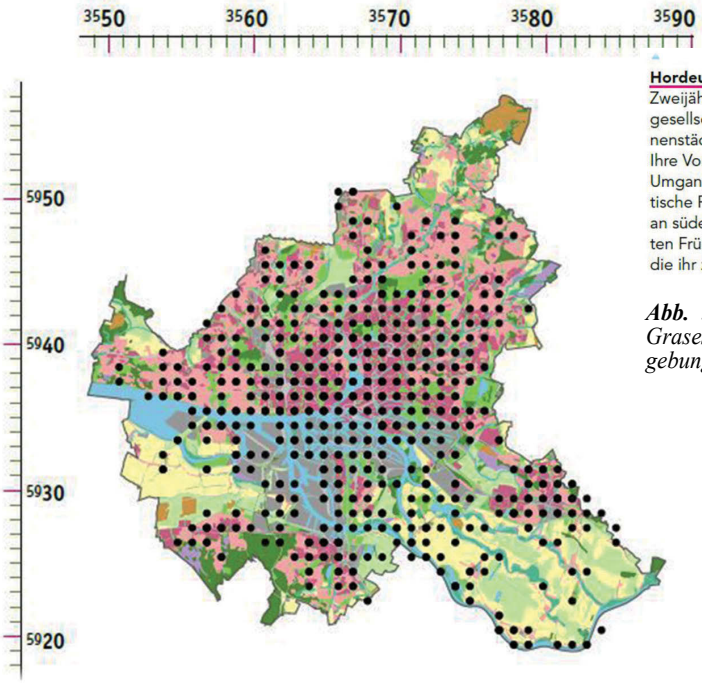


Ailanthus altissima *Götterbaum E **
Raschwüchsiger zweihäusiger Laubbaum mit Fiederblättern und energischer vegetativer Vermehrung durch Ausläufer. Der typische Stadtbaum ist in Hamburg seltener als in Städten mit kontinental getöntem Klima. Erste Einbürgerungen auf Trümmerflächen der Nachkriegszeit. Der Jungwuchs der aktuellen Verjüngungen wird regelmäßig entfernt und gelangt meist nicht bis zur Blüh- oder Fruchtreife. Die spontanen Vorkommen sind im Wesentlichen auf die städtische Wärmeinsel beschränkt.

Abb. 5.1-1: *Verbreitung des Götterbaum in Hamburg und Umgebung.*

orte unterscheiden sich krass von Schilfvorkommen in Feuchtgebieten. Da nahezu gleichzeitig an vielen unterschiedlichen Stellen juvenile Pflanzen vorgefunden wurden, kann eine Ausbreitung durch Verschleppung von Rhizomen ausgeschlossen werden. Es wird vermutet, dass das Schilf sich hier in den Jahren 2011 und 2012 mit extrem hohen Temperaturen im Mai generativ (über Früchte) angesiedelt hat. Die Keimung des Schilfs wird durch niedrige Temperaturen behindert und durch starke Unterschiede zwischen Tag- und Nachttemperatur gefördert. Pflasterfugen sind extrem lichtreiche und konkurrenzarme Standorte mit extrem hohen Maximaltemperaturen, starker Nachtabsenkung und geringer Verdunstungsrate. Unter ihnen kann versickertes Wasser lange gespeichert und über die oft moosbewachsenen Fugen pflanzenverfügbar gemacht werden. In Jahren mit einem extrem warmen Frühjahr können Pflasterfugen daher gute Keimungsbedingungen für Schilffrüchte bieten. In diesem Zusammenhang ist interessant, dass der aus Europa eingeführte Genotyp des Schilfs *Phragmites australis* in Nordamerika als invasiver Neophyt gilt, für dessen Ausbreitung dort Straßenränder eine wichtige Rolle spielen (Literatur siehe Poppendieck 2016). Der Befund, dass sich eine Feuchtgebietsart ausgerechnet in warmen Frühjahren auf innerstädtische Standorte ausbreitet, erscheint paradox, macht aber deutlich, welche komplexe Wirkungsketten bei der Auswirkung der globalen Erwärmung auf das Pflanzenleben in der Stadt zu erwarten sind.

Lorbeerkirsche (*Prunus laurocerasus*) und andere immergrüne Gehölze - Laurophyllisierung bezeichnet die Ausbreitung immergrüner Gehölze in laubwerfende Wälder. Es wurde zuerst in den 1980er Jahren für die insubrischen Wälder auf der Südflanke der Alpen beschrieben und bald als Folge der globalen Erwärmung gedeutet (Walther 2001). Auch die Verschiebung der nördlichen Verbreitungsgrenze der Stechpalme *Ilex aquifolium* in Südskandinavien (Walther et al. 2005) oder die Zunahme der Vitalität des Efeus *Hedera helix* in den Wäldern um Göttingen (Dierschke 2005) ist in diesem Sinne gedeutet worden. Ein Beispiel für die Laurophyllisierung im Stadtklima bietet die seit 2002 stark zunehmende Verwilderung der Lorbeerkirsche *Prunus laurocerasus* im Ballungsraum des Ruhrgebiets, wo sie als zweihäufigste klimasensitive Gehölzart angesehen wird (Hetzel 2014). Ihre Zunahme wird hier auf die verlängerte Vegetationsperiode, die milderen Winter mit ausbleibenden Winterschäden und die höheren Sommertemperaturen und deren Wirkung auf Keimung, Frucht- und Blütenbildung zurückgeführt. In Hamburg wird seit einigen Jahren ein starkes Vordringen der Lorbeerkirsche und heimischer Immergrüner (Stechpalme, Efeu, Eibe) in stadtnahe Wälder beobachtet (Bertram, mdl.). Stadtspezifisch ist hier, im Ruhrgebiet und auch in Berlin (Seidling 2001), dass im Gegensatz zu ländlichen Gebieten in den Gärten zahlreiche immergrüne Gehölze als Samenspender zur Verfügung stehen.



Hordeum murinum *Mäuse-Gerste I **
Zweijähriges Wärme liebendes Gras in ruderalen Rasengesellschaften. Kaum eine Pflanze charakterisiert die Innenstädte besser als die »Sommerblonde Mäuse-Gerste«. Ihre Vorkommen sind jedoch sowohl auf den spezifischen Umgang der Städter mit dem Wegrandgrün wie auf klimatische Faktoren zurückzuführen (Hard 1998). Auch häufig an südexponierten Elbdeichen, wohin die lang begrannten Früchte durch Schafe verschleppt werden und die Art die ihr zusagenden warmen, besonnten Standorte findet.

Abb. 5.1-2: *Verbreitung des wärmeliebenden Grases, Mäuse-Gersten in Hamburg und Umgebung.*

***Mäusegerste* (Hordeum murinum)** - Die Mäuse-Gerste (*Abb. 5.1-2*) ist ein einjähriges wärmeliebendes Gras und gilt als Wärmezeiger (Floraweb 2019). In Deutschland liegt der Schwerpunkt der Verbreitung in den Ballungsräumen und im mitteldeutschen Trockengebiet. Im kühlen Nordwestdeutschland ist die Art auf größere Orte beschränkt, zum kontinentalen Osten und Süden hin lockert sich die Bindung an die Stadt. In vielen Städten koinzidiert ihr Verbreitungsschwerpunkt mit der städtischen Wärmeinsel. Dafür muss jedoch nicht vorrangig das Stadtklima verantwortlich sein, denn Städte bieten nach Substrat, Kleinklima sowie Art und Grad der Störung seit langem günstige Standorte für die Art (Hard 1998). Bei anderen »wärmeliebenden Stadtpflanzen« wie *Buddleia davidii* oder *Ailanthus altissima* dürfte die Sache ähnlich liegen. Wieder anders stellt sich die Situation auf der lokalen Ebene in einem Stadtteil dar (Schlegel 2012). Die Mäuse-Gerste ist hier vor allem gebunden an die Biotoptypen Blockrandbebauung und Verkehrsflächen, zeigt dabei aber eine deutliche Präferenz für in Ost-West-Richtung verlaufende Straßen mit warmer Südexposition.

Verhalten der Pflanzenart, Evolution

Städte können eine wichtige Funktion für die heutige Evolution haben, denn Urbanisierung kann phänotypische Änderungen bei Arten bewirken und diese sogar beschleunigen. Alberti et al. (2017) zeigten in einer Metaanalyse, dass phänotypische Änderungsraten in urbanen Systemen schneller sind als in natürlichen oder nicht städtischen Systemen.

In einer Studie im Gewächshaus mit urbanen und ruralen Populationen von *Crepis sancta* fanden Lambrecht et al. (2016) heraus, dass die urbanen Pflanzen größer waren und später blühten und auch verblühten. Sie hatten außerdem eine höhere photosynthetische Kapazität und Wassernutzungseffizienz sowie höhere Stickstoffkonzentrationen in den Blättern als rurale Pflanzen, die unter denselben Bedingungen angezogen wurden. Diese Unterschiede konnten demnach nicht nur auf Akklimatisierung zurückgeführt werden sondern vielmehr auf eine physiologische Anpassung an das Stadtklima.

Für die in Südafrika heimische Art *Senecio inaequidens* (Schmalblättriges Greiskraut) konnten für Hamburger Populationen experimentell Hinweise gefunden werden, dass die Pflanzenart sich schnell an lokale Umweltveränderungen anpassen kann, damit wird auch eine erhöhte Anpassungsfähigkeit an durch den Klimawandel veränderte Umweltbedingungen angenommen. Individuen aus Populationen, die aus innerstädtischen Gebieten stammen, verteidigten sich mit einer anderen Strategie gegen Herbivoren als Pflanzen aus Populationen aus weniger urbanisierten Gebieten. Individuen der urbanen Population, die unter einem geringen Herbivorendruck stehen, wiesen einen geringeren konstitutiven Schutz durch sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe zur Abwehr auf. Außerdem war die Keimungsrate bei allen Populationen bei erhöhten Temperaturen höher, was auch auf eine gute Anpassungsfähigkeit an das Stadtklima und den Klimawandel deutet (Steinke 2011, Schmidt 2014).

Verhalten der Flora

Urbanisierung filtert die Flora eines Gebiets in Richtung thermophiler Pflanzenarten, die gleichzeitig toleranter gegenüber Trockenheit sowie lichtliebender sind als Floren anderer Gebiete (Williams et al. 2015). Für die niederländische Flora stellten Tamis et al. (2005) eine Zunahme an wärmeliebenden Arten in urbanen Gebieten in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts fest. Dieser Anstieg wurde neben der Urbanisierung auch auf steigende Temperaturen durch den Klimawandel zurückgeführt. Urbanisierung reduzierte in der Brüsseler Flora seit den 1940er Jahren den Anteil heimischer Arten, während der Anteil Neophyten zunahm, dies wurde u.a. auch mit dem Klimawandel in Verbindung gebracht (Godefroid 2001). Auch in einer Frankfurter Studie wurden Veränderungen in der Flora seit 1800 – die Zunahme von kurzlebigen Neophyten trockener und offener Habitate sowie C4-Neophyten - auf ein wärmeres Klima zurückgeführt (Gregor et al. 2012). Celesti-Grapow & Blasi (1998) nehmen hingegen an, dass der Effekt einer städtischen Wärmeinsel im mediterranen Gebiet eine viel geringere Rolle spielt als im kontinentalen und zentralen Europa, da sich entsprechende Hinweise für urbane italienische Floren nicht finden ließen.

Florendaten lassen sich auch als stellvertretende Daten für die städtische Wärmeinsel nutzen, die Wärmeinsel lässt sich bereits in der Verbreitung einiger Pflanzenarten in Hamburg wiedererkennen (s.o.). Bechtel & Schmidt (2011) nutzten dazu die Verbreitung von Ellenbergschen Temperaturzeigerwerten der Hamburger Flora. Diese geben auf einer Skala von 1 bis 9 an, ob eine Pflanzenart ein Kälte- (1) oder ein Wärmezeiger (9) ist (Ellenberg et al. 1992). Unter der Annahme, dass die Artenzusammensetzung eines Gebietes die klimatischen Bedingungen eines Zeitraumes reflektiert, wurden diese Werte den in der Stadt Hamburg vorkommenden Arten zugeordnet (1 km²-Raster) und für jede Rasterzelle gemittelt. Die mittleren Zeigerwerte spiegelten deutlich das räumliche Muster der städtischen Wärmeinsel wieder und waren hoch mit Messwerten korreliert. Somit bewies sich der Datensatz geeignet als Proxy für Temperaturdaten und konnte stellvertretend für eine kleinskalige Darstellung der Wärmeinsel genutzt werden (Bechtel & Schmidt 2011).

Fazit

Bereits jetzt zeichnen sich innerstädtische Lebensräume gegenüber dem Umland durch erhöhte Temperaturen und höhere Trockenheit aus. Durch den globalen Klimawandel dürfte sich dieses Phänomen noch verstärken. Damit die gepflanzte Vegetation (Straßenbäume, Parks, Gründächer usw.) die gewünschten Ökosystemdienstleistungen weiterhin erbringen kann, werden neue Pflanzstrategien erforderlich sein. Die spontane Stadtvegetation reagiert typischerweise flexibel und robust auf Veränderungen und Störungen, ihr Anteil geht aber in den heutigen mitteleuropäischen Metropolen stetig zurück. Grundsätzlich sollten Vorhersagen über die im Zuge des Klimawandels zu erwartenden Reaktionen der städtischen Flora und Vegetation mit Vorsicht formuliert werden, da sich die Effekte des Klimawandels oft nicht eindeutig von denen der Urbanisierung trennen lassen.

Literatur

ALBERTI M., C. CORREA, J. M. MARZLUFF et al. (2017): Global urban signatures of phenotypic change in animal and plant populations. PNAS 114(34). 8951-8956.

BECHTEL B. & K. J. SCHMIDT (2011): Floristic mapping data as a proxy for the mean urban heat island. Climate Research, 49(1): 45-58.

BRANDES D. (2010): Langzeitbeobachtungen der Ruderal- und Adventivflora von Niedersachsen. *http://www.flora-deutschlands.de/Dateien/Dateien_2010/tagung_2010/Langzeitbeobachtungen.pdfBrandes.*

CELESTI-GRAPOW L. & C. BLASI (1998): A comparison of the urban flora of different phytoclimatic regions in Italy. Global Ecology and Biogeography 7(5):367-378.

DICKHAUT W. & A. ESCHENBACH (Hrsg.) (2019): Entwicklungskonzept Stadtbäume – Anpassungsstrategien an sich verändernde urbane und klimatische Rahmenbedingungen. Hafencity Universität.

DIERSCHKE (2005): Laurophyllisation – auch eine Erscheinung im nördlichen Mitteleuropa? Zur aktuellen Ausbreitung von *Hedera helix* in sommergrünen Laubwäldern. Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft 17, S. 151-168.

DWD (Deutscher Wetterdienst) (2019): Forsythien-Kalender für den Standort "Hamburger Lombardsbrücke". *https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/phaenologie/produkte/ langereihen/langereihen.html* (abgerufen 15.10.2019).

ELLENBERG H., R. DÜLL, W. WIRTH, W., WERNER & D. PAULISSEN (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, 2nd edn. Erich Goltze KG, Göttingen.

FRANZEN E. (1955): Der Beginn der Forsythienblüte in Hamburg 1955. Ein Beitrag zur Phänologie der Großstadt. Meteorologische Rundschau 8(7/8):113-115.

GALLINAT A. S., R. B. PRIMACK & D. L. WAGNER (2015): Autumn, the neglected season in climate change research. Trends in Ecology & Evolution 30:169-176.

GODEFROID S (2001): Temporal analysis of the Brussels flora as indicator for changing environmental quality. Landscape and Urban Planning 52(4):203-224.

GREGOR T., D. BOENSEL, I. STARKE-OTTICH & G. ZIZKA (2012): Drivers of floristic change in large cities - A case study of Frankfurt/Main (Germany). Landscape and Urban Planning 104(2):230-237.

HARD G. (1998): Ruderalvegetation. Notizbuch 49 der Kasseler Schule, 394 S. Kassel.

HARRISON T. & R. WINFREE (2015): Urban drivers of plant-pollinator interactions. Functional Ecology 29, 879–888.

HETZEL I. (2014): *Prunus laurocerasus* – Lorbeerkirsche, Kirschlorbeer (Rosaceae), Giftpflanze des Jahres 2013. - Jahrb. Bochumer Bot. Ver. 5: 255-262.

JOCHNER S. & A. MENZEL (2015): Urban phenological studies - Past, present, future. Environmental Pollution 203: 250-261.

KNAPP S., I. KUEHN, R. WITTIG et al. (2008): Urbanization causes shifts in species' trait state frequencies. Preslia 80(4):375-388.

KOWARIK I. (1992): Das Besondere der städtischen Flora und Vegetation. In: Deutscher Rat für Landespflege. Natur in der Stadt - Der Beitrag der Landespflege zur Stadtentwicklung. Gutachtliche Stellungnahme und Ergebnisse eines Kolloquiums des Deutschen Rats für Landespflege. Vol 61, pp 33-47.

KOWARIK I. & I. SÄUMEL (2007): Biological flora of Central Europe: Ailanthus altissima (Mill.) Swingle. Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics 8(4):207-237.

KÜHN I., R. BRANDL & S. KLOTZ (2004): The flora of German cities is naturally species rich. Evolutionary Ecology Research, 6: 749-764.

LAMBRECHT S. C., S. MAHIEU & P.-O. CHEPTOU (2016): Natural selection on plant physiological traits in an urban environment. Acta Oecologica 77. 67-74.

LINDBERG F. & C. S. B. GRIMMOND (2011): Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. Urban Ecosystems 14(4):617-634.

MCKINNEY M. L. (2002): Urbanization, biodiversity, and conservation. BioScience 52(10):883-890.

MCKINNEY M. L. (2008): Effects of urbanization on species richness: A review of plants and animals. Urban Ecosystems 11:161-1769.

OKE T. R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108:1-24.

POPPENDIECK H.-H. (2016): Bemerkenswerte spontane Vorkommen von Schilf (*Phragmites australis*) in Pflasterfugen an innerstädtischen Straßen in Hamburg. – Berichte des Botanischen Vereins zu Hamburg 30: 91-96.

PRETZSCH H., P. BIBER, E. UHL, J. DAHLHAUSEN et al. (2017): Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. Scientific Reports 7, Article 15403.

PYŠEK P. (1993): Factors affecting the diversity of flora and vegetation in Central-European settlements. Vegetatio 106(1): 89-100.

REBELE F. (1994): Urban ecology and special features of urban ecosystems. Global Ecology and Biogeography Letters 4(6):173-187.

REICHHOLF J. H. (2007): Stadtnatur. Eine neue Heimat für Tiere und Pflanzen. 318 S. Oekom, München.

ROETZER T., M. WITTENZELLER, H. HAECKEL & J. NEKOVAR (2000): Phenology in central Europe - differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. International Journal Biometeorology 44(2):60-66.

SCHLEGEL D. (2012): Ruderalvegetation: Kartierung und Analyse des Vorkommens von *Hordeum murinum* L. in unterschiedlichen Wohnquartieren Hamburgs. Bachelorarbeit Studiengang Lehramt an Gymnasien, Fach Biologie. 28 S. plus Anhang.

SCHMIDT K. (2014): Plants in urban environments in relation to global change drivers at different scales. PhD Thesis, Universität Hamburg, Hamburg.

SCHÖNFELD P. (2018): Klimabäume: welche Arten sind zukunftsträchtig? Stadt + Grün Pro Baum 03/2018. *https://stadtundgruen.de/portale/archiv/ausgabe/pb-2018-03.html?L=0&cHash=6a2fbdc9790688a5453ed-95284de7c2b.*

SEIDLING W. (2001): *Taxus baccata* und *Ilex aquifolium* – zwei „Atlantiker" in Berliner Wäldern. – Verh. Bot. Ver. Berlin Brandenburg 134: 31-59.

STEINKE J. (2011): Pflanzliche Abwehrmechanismen in einem sich erwärmenden Klima: Quantitative Untersuchung der Pyrrolizidinalkaloide in *Senecio inaequidens* DC. und ihrer Induktivität entlang eines urban-ruralen Gradienten. Bachelorarbeit, Universität Hamburg.

TAMIS W. L., M. VAN'T ZELFDE, R. VAN DER MEIJDEN & D. E. HAES HA (2005): Changes in vascular plant biodiversity in the Netherlands in the 20th century explained by their climatic and other environmental characteristics. Climatic Change 72(1-2):37-56.

WALTHER G. R. (2001): Climatic forcing on the dispersal of exotic species. Phytocoenologia 30: S. 409-430.

WALTHER G. R., S. BERGER & M. T. SYKES (2005): An ecological 'footprint' of climate change. Proc. R. Soc. B 272: 1427-1432. London.

WILLIAMS N. S. G., A. K. HAHS & P. A. VESK (2015): Urbanisation, plant traits and the composition of urban floras. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics 78. 78-86.

ZERBE S., U. MAURER, S. SCHMITZ & H. SUKOPP (2003): Biodiversity in Berlin and its potential for nature conservation. Landscape and Urban Planning 62(3):139-148.

Kontakt:

Dr. Katharina Schmidt
k-j-schmidt@gmx.net
Dr. Hans-Helmut Poppendieck
hans-helmut.poppendieck@web.de

Schmidt K. & H.-H Poppendieck (2019): Pflanzenreaktionen auf das Stadtklima. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 159-165. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.23.

5.2 Klimawandel und invasive gebietsfremde Arten in Städten

Tom Steinlein

Lange Zeit waren Städte Hotspots gebietsfremder Arten. Mit dem Klimawandel wird das Invasionspotential nicht-heimischer Arten steigen und Städte werden immer mehr zu Ausbreitungszentren von Exoten in die freie Landschaft. Die Diversität dieser exotischen Arten in Städten bleibt weiterhin hoch und auch bei der Erhaltung eines erträglichen Innenstadtklimas setzt man vermehrt v.a. auch bei Bäumen auf nicht indigene Arten.

Climate change and alien invasive species in urban habitats: *For a long time, cities have been hotspots of alien species. With climate chance invasion potential of aliens will rise and cities will be transformed to centers of spontaneous spread from the city to the countryside. Diversity of alien species in urban areas will stay high due to the fact that many planted trees (beneficial for inner city climate) are non-indigenous species.*

Urbane Lebensräume waren lange Zeit Hotspots der Biodiversität gebietsfremder Arten. Dazu zählen sowohl Pflanzenarten (Neophyten), Tierarten (Neozoen) als auch die weniger erforschten gebietsfremden Pilze (Neomyzeten) und Mikroorganismen.

Allein von Neophyten sind heute in Deutschland und Österreich jeweils mehr als 1000 Arten bekannt, davon haben sich mehrere 100 Arten in verschiedenen Ökosystemen (auch in der Stadt) etabliert (DAISIE 2009).

In jüngster Zeit sind Mikroorganismen in den Fokus geraten, die sich – mittels blutsaugenden Insekten als Vektoren – als pathogene Organismen in Mitteleuropa ausbreiten. Das Problem der biologischen Invasionen ist mit dem Klimawandel auch zu einem medizinischen Problem geworden.

Die Gründe dieser Ausbreitung sind multidimensional. Unterschieden wird dabei zwischen bewusster Einführung und unbeabsichtigter Einschleppung. Beides hat zu Problemen geführt, die sich nicht immer auf reine Naturschutzprobleme beschränken, sondern auch ökonomische und gesundheitliche Probleme verursachen. Dies wird sich in Zukunft mit dem fortschreitenden Klimawandel verstärken. Der Klimawandel kommt diesen Arten deshalb zugute, weil sie oft über eine hohe physiologische Anpassungskapazität gegenüber sich verändernden Umweltbedingungen (zunehmende Wärme, zunehmende Trockenheit) verfügen, ein großes Ausbreitungspotenzial (vegetativ und reproduktiv) aufweisen oder passende Fraßfeinde fehlen. Damit können sie positiv auf die Lebensraumveränderungen reagieren und gehören so »zu den Gewinnern des Klimawandels«.



Abb.5.2-1: *Das beifußblättrige Traubenkraut, Ambrosia. Seine Pollen gehören zu den stärksten Allergie-Auslösern.*

Städte – Hotspots gebietsfremder Arten? Das war einmal …

In Großstadtzentren kann man davon ausgehen, dass der Bestand von gebietsfremden Pflanzenarten bei 40-50% liegt (Kowarik 2010). Kein Wunder: In Städten kulminieren der Umschlag von – mit möglicherweise unerwünschtem exotischem Samenmaterial kontaminierten – Waren und die Reisetätigkeit von Menschen.



Abb. 5.2-2: *Riesenbärenklau. Er stammt ursprünglich aus dem Kaukasus. Verbrennungsgefahr bei Berührung.*

Innenstädte zeichnen sich auch dadurch aus, dass dort immer wieder offene Flächen entstehen, die für die – bewusst oder unbewusst ausgebrachten – exotischen Arten einen Wiederbesiedlungsvorteil verschaffen. Studien zu Prognosen der Ausbreitung gebietsfremder Arten in zukünftigen Jahren gehen davon aus, dass sich die Invasions-Hotspots aus den innerstädtischen Ballungsräumen und der Bindung vieler Exoten an solche Regionen hin zu ländlichen Regionen verschieben werden. So konnte z.B. in Österreich gezeigt werden, dass sich das Invasionsrisiko für Trockenrasen und Trockenwälder durch die nordamerikanische und anfangs als Parkbaum gepflanzte Robinie (*Robinia pseudoacacia*) unter dem Klimawandel deutlich erhöhen wird.

Viele Arten werden auch bewusst im innerstädtischen Bereich von Hobby-Tierhaltern ausgesetzt. Diese wärmeliebenden Arten profitieren vom Stadtklima. So kommen z.B. in Wuppertal viele ausgesetzte Tierarten aus dem Mittelmeerraum oder Amerika wild vor (Kowarik 2010): Mauergecko (*Tarentula mauritanica*), Halsbandeidechse (*Lacerta pityusensis*), griechische Landschildkröte (*Testudo hermanni*), Wechselkröte (*Bufo viridis*), Leopardfrosch (*Rana pipiens*) oder die iberische Ringelnatter (*Natrix astreptophora*).

Einige Vogelarten nutzen auch das innerstädtische Nahrungsangebot und leben ganzjährig (auch als Zugvogelarten) in den innerstädtischen Wärmeinseln wie zum Beispiel die Kanadagans (*Branta canadensis*) oder die Nilgans (*Alopochen aegyptiacus*). Im Stuttgarter Rosensteinpark finden wir in den dort angepflanzten Platanen eine wachsende Kolonie von Gelbscheitelamazonen (Amazona ochrocephalana, Heimat Amerika), die zu den Papageien gehören (Hoppe & Martens 2013). Die im Stadtklima immer milder werdenden Winter ermöglichen das Fortbestehen bzw. Anwachsen der Population.

Neue Insekten: Das bekannteste Beispiel ist die Rosskastanienminiermotte (*Cameriaria ohridella*). Diese »Biergartenmotten« fliegen in großen Schwärmen an lauen Sommerabenden unter den – auch nichtheimischen – südosteuropäischen Rosskastanien (*Aesculus hippocastaneum*).

Neue Mollusken: Die Spanische Wegschnecke (*Arion lustitanicus*) hat in Siedlungsbereichen die heimische rote Wegschnecke (*Arion rufus*) nahezu verdrängt (Kowarik 2010).

Lange Zeit nahm man an, dass nicht heimische Arten v.a. auf durch den Menschen gestörten Flächen, wie wir sie in Städten antreffen, gehäuft vorkommen und die natürliche Vegetation relativ »immun« gegenüber einer Invasion solcher Arten ist. Lohmeyer & Sukopp (2001) konnten zeigen, dass wir viele Arten, die im Stadtbereich auf anthropogene Störungen angewiesen sind, auch an Standorten, die eine natürliche Störung aufweisen wie z.B. an Überflutungsbereichen von Flüssen, in Küstennähe oder an anderen teilweise offenen Standorten finden.

Lebensbedingungen in der Stadt: Heiß, trocken und gutes Ressourcenangebot

Städte waren schon immer Wärmeinseln, die sich durch basenreiche, trockene Böden und hohe Lufttemperaturen auszeichneten (Huidong et al. 2018). So betrug zum Beispiel für die Stadt Hamburg der Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land seit den 1960er Jahren im Jahresmittel ca. 1,1 °C. Auch in Kleinstädten wie z.B. Lübeck mit einem hohen Versiegelungsrad im Zentrum kann ein Wärmeinsel-Effekt auftreten (Schoenberg et al. 2014). Bautätigkeit oder Grünflächenpflege fördern neue und offene Pionierstandorte. So entsteht ein kleinräumiges Mosaik verschiedener Standorte. Anthropogene Störungsregime fördern nicht heimische (Pflanzen-)Arten (Dietz & Steinlein 2004). Diese stammen von Ruderalstandorten häufiger Störung oder kommen aus wärmeren Gebieten und weisen eine physiologische Amplitude auf, die im Verhältnis zu den einheimischen Arten zu wärmeren bzw. trockeneren Bedingungen verschoben ist.

Schon heute lässt sich folgendes beobachten: Die in Parkanlagen oftmals gepflanzte Blauglockenbaum (*Paulownia tomentosa*), eine frostempfindliche Laubbaumart, breitet sich in den letzten Jahren in urbanen Gebieten (z.B. Tübingen, Basel, Zürich) und auch in Wäldern der Schweiz (z.B. im Tessin) immer stärker spontan aus. Gleiches gilt auch für den Götterbaum (*Ailanthus altissima*). Die Hanfpalme (*Trachycarpus fortunei*), eine wenig frostempfindliche Parkpflanze wird sich Prognosen zufolge auch bei uns spontan ausbreiten, wie jetzt schon in den Süd-Kantonen der Schweiz. Aber auch Neozoen profitieren von der steigenden Erwärmung in den Städten. Es wird prognostiziert, dass der aus Köln bekannte Halsbandsittich (*Psittacula krameri*), der bisher nur in einigen Städten in kleinen Populationen auftrat, in seinem Reproduktionserfolg durch ansteigende Temperaturen weiter gefördert wird.

Problematische Neophyten in Städten

In anthropogen überformten Städten werden Naturschutz-Fragen kaum eine Rolle bei der Betrachtung gebietsfremder Arten spielen. Ganz anders ist die Sache, wenn wir von ökonomischen Schäden oder gesundheitlichen Problemen sprechen. Eines der bekanntesten Beispiele ist das des Waschbären, der mit zwei Paaren 1934 am Edersee (Hessen) ausgesetzt wurde. Die starke Vermehrung führte dazu, dass die Kleinstadt Bad Karlshafen unter den verstädterten Waschbären litt (Hohmann et al. 2001).

Gesundheitliche Probleme verursachen z.B. die Giftpflanze des Riesenbärenklaus (*Abb. 5.2-2, Heracleum mantegazzianum*), die bei Berührung schwere Verbrennungen verursachen kann oder das Beifußblättrige Traubenkraut (*Abb. 5.2-1, Ambrosia artemisiifolia*). Letzteres, als Verunreinigung in Vogelfutter eingeschleppt, breitet sich im Zuge des Klimawandels Richtung Norden aus. Es hat um ein Vielfach höheres Allergiepotential als Gräser und die Kosten für das Gesundheitswesen werden in Zukunft enorm ansteigen. Lake et al. (2017) gehen davon aus, dass sich die heutigen Traubenkraut-Allergikerzahlen in Europa von 33 Mill. bis 2050 auf 77 Mill. etwa verdoppeln werden.

Vom Garten in die freie Wildbahn

Die Sehnsucht nach Exotischem und Neuem ist so alt wie die Menschheit selbst und hat sowohl ökonomische als auch emotionale Gründe. So holte man sich exotische Pflanzen in die heimischen Gärten. Die Folge: nahezu alle heute bekannten problematischen nichtindigenen Pflanzen wurden früher als Gartenpflanze eingeführt bzw. kultiviert. Von dort konnten sie sich spontan ausbreiten. Waren es anfangs nur Prunkgehabe adeliger HerrscherInnen (wer hat den schönsten neuen Baum?) oder wissenschaftliches Interesse von BürgerInnen, ist es heute eher zu einer Notwendigkeit geworden auf gebietsfremde Arten zurückzugreifen. Mit dem sich veränderten Klima ist man sowohl in den Wäldern (z.B. Anpflanzung der Douglasie in den absterbenden Fichtenforsten) als auch in den sich aufheizenden Städten auf der Suche nach robusten und wärme- bzw. hitzetoleranten Bäumen. Ob das der richtige Weg ist, sei dahingestellt. Dass der »Sprung über den Gartenzaun« tatsächlich problematisch sein kann, zeigt sich beim aus Asien stammenden Schmetterlingsstrauch (*Buddleja davidii*). Als Zierstrauch in Städten angepflanzt, wurde er bald zur typischen Industriebrachenpflanze im Ruhrgebiet. Seine spontane Ausbreitung führte ihn auch in Flussauen. In der Schweiz hatte dies zur Folge, dass Buddleja auf der Schwarzen Liste steht, weil seine dichten Bestände in Auen die heimischen Pflanzen und Tiere verdrängen.

Bäume pflanzen ...

Wohl eine der einfachsten Methoden dem steigenden Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre zu begegnen, ist es Bäume zu pflanzen. Stadtbäume sind grundsätzlich extremen Bedingungen an ihrem Standort ausgesetzt. Dazu gehören ein hoher Versiegelungsgrad, eine hohe Verdichtung des Bodens, ein zeitweise hoher Salzgehalt und erhöhte Temperaturen. In den letzten Jahrzehnten versucht man heimische Bäume durch »tolerantere« bzw. robustere exotische Arten zu ersetzen. Zwei der bekanntesten Beispiele sind die Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*, Ursprung Balkan) und der

***Tab. 5.2-1**: Stadtbäume der Zukunft – Empfehlungen für neu anzupflanzende Baumarten aus dem Forschungsprojekt Stadtgrün 2021 (Tabelle verändert nach Böll (2018).*

Art	deutscher Name	Herkunftsland
Acer buergerianum	Dreizahnahorn	östliches China und Japan
Acer monspessulanum	Französischer Ahorn	Mittelmeergebiet
Acer opalus	Schneeballahorn	Nordafrika, Mittelmeerraum
Alnus x spaethii	Purpurerle	Hybrid aus japanischer Erle und kaukasischer Erle (Japan, Kaukasus)
Celtis australis	Zürgelbaum	Portugal, Spanien
Gingko biloba	Gingko	China
Gleditsia triacanthos „Skyline“	Gleditsie	Nordamerika
Juglans nigra	Schwarznuss	Nordamerika
Liquidambar styraciflua	Amberbaum	östliches Nordamerika, Mittelamerika
Magnolia kobus	Kobushi-Magnolie	Japan
Ostrya carpinifolia	Hopfenbuche	Mittelmeer, Südalpen
Platanus orientalis	Morgenländische Platane	Mittelmeer bis Himalaya
Quercus cerris	Zerreiche	Mittelmeer, Südosteuropa
Tilia americana	Amerikanische Linde	Nordamerika
Tilia mongolica	Mongolische Linde	Mongolei, Nordchina
Zelkova serrata	Japanische Zelkove	Japan

Götterbaum (*Ailanthus altissima*, Ursprung China, Korea). Letzterer breitet sich jetzt hier spontan aus.

Bislang ist eine »bessere« Eignung nicht heimischer Pflanzen gegenüber den heimischen Stadtbäumen nicht exakt wissenschaftlich belegt. Eine Möglichkeit auch den heimischen Bäumen Wuchsmöglichkeiten zu bieten, wäre es, die Standortbedingungen zu verbessern, z.B. in dem man die Baumscheiben – soweit planerisch möglich – vergrößert.

Die Funktionen für das Stadtklima werden beide – einheimische wie nicht heimische - erfüllen müssen: Filterung von Feinstaub aus der Luft, Schattenspenden durch große Baumkronen, Schaffung eines spezifischen Mikroklimas durch Verdunstungskühlung, oder ästhetische Aspekte. Bisher zeigten sich einige heimische Baumarten durchaus robust genug, um das innerstädtische Extremklima auszuhalten wie zum Beispiel die Hainbuche (*Carpinus betulus*) oder die Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*). Viele heimische klassische Straßenbaum- oder Parkarten wie die heimischen Ahornarten oder die Linden werden den zunehmenden Hitze- und Trockenheitsperioden jedoch nicht mehr gewachsen sein und man überlegt, sie durch nicht indigene Bäume zu ersetzen (Roloff 2013). Auf der Liste der geeigneten Bäume KLAM (KLimaArtenMatrix) der Uni Dresden finden wir daher auch einige Neophyten (N): Feld-Ahorn, Grau-Erle, Zitter-Pappel, Vogel-Kirsche, Gemeine Robinie (N), Ginkgo (N), Virginische Hopfenbuche (N) oder Zerr-Eiche (N).

Andere Experten haben ein »Klimabaumsortiment« zusammengestellt. Die darin aufgezählten Bäume sind besonders robust und werden bei Neupflanzungen empfohlen. In der Studie »Stadtgrün 2021« werden 20 Baumarten auf ihre Verwendung als neue Stadtbäume getestet (Böll 2018). *Tab. 5.2-1* zeigt eine Auswahl der Arten und ihre unterschiedlichen Herkünfte. Ob diese Bäume später zu einer spontanen Selbstetablierung außerhalb der Städte fähig sind, wie man es beispielsweise bei der extrem problematischen spätblühenden Traubenkirsche (*Prunus serotina*) erlebt hat (Kowarik 2010), muss abgewartet werden.

Was ist zu tun?

In urbanen Lebensräumen, die »natürliche« bzw. »quasi-natürliche« Lebensräume eher selten aufweisen, werden wir uns bezüglich der exotischen Arten geringe Sorgen machen müssen. Auch die Stadtplaner muss man verstehen, denen nichts anderes übrig bleibt als auf hitzetolerante und trockenheitsadaptierte (auch) nicht heimische Gehölze zurückzugreifen, um ein für den Menschen erträglicheres Stadtklima in Parks zu schaffen. Problematisch wird in Städten die Lage dort wo es gesundheitliche und ökonomische Probleme gibt. Ein Riesenbärenklau (*Heracleum mantegazzianum*) z.B. auf Spielplätzen ist ein absolutes No-Go. Solche Einzelexemplare können leicht entfernt werden. Andere Phänomene wie die Ausbreitung der Ambrosie durch verunreinigtes Vogelfutter oder die Verbreitung von Arten durch achtlos im Parks entsorgte Gartenabfälle erfordern Aufklärung und gezielte Bekämpfung. Kaum Herr werden wird man aber globaler Phänomene wie zum Beispiel der Ausbreitung der Tigermücke (*Aedes albopictus*). Diese wird sich auch in innerstädtischen Tümpeln weiter ausbreiten und für die damit einhergehenden Verbreitung gefährlicher Viren (Zika-Virus, West-Nil Virus, ...) sorgen (Scholte & Schaffner 2007).

Globale Erwärmung verbunden mit steigenden Warentransporten, eine zunehmende Reisetätigkeiten des Menschen und seine enge Vergesellschaftung mit vielen Organismen werden weiterhin von Städten aus in die freie Landschaft zu einer Ausbreitung gebietsfremder Arten führen.

Literatur

BÖLL S. (2018): Stadtbäume der Zukunft – Wichtige Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt »Stadtgrün 2021«. Veitshöchheimer Berichte 184: 77-87.

DAISIE (2009): Handbook of Alien Species in Europe. Springer, Dordrecht, 399 pp.

DIETZ H. & T. STEINLEIN (2004): Recent Advances in Understanding Plant Invasions. In: Esser K., U. Lüttge, W. Beyschlag & J. Murata (eds): Progress in Botany, vol 65: 539-573, Springer, Berlin, Heidelberg.

HOHMANN U., S. VOIGT & U. ANDREAS (2001): *Quo vadis raccoon*? New visitors in our backyards - On the urbanization of an allochthone carnivore in Germany. - In: Gottschalk E., A. Barkow, M. Mühlenberg & J. Settele (eds.): Naturschutz und Verhalten. - Leipzig. UFZ-Bericht 2/2001: 143-148.

HOPPE D. & J. MARTENS (2013): Seltenheit in Europa: Schwäbische Papageien. Der Falke 60: 456-457.

HUIDONG L., F. MEIER, X. LEE, T. CHAKRABORTY et al. (2018) Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. Science of the Total Environment 636, 818-828.

KOWARIK I. (2010) Biologische Invasionen. Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa. 2. Auflage, Ulmer, Stuttgart.

LAKE I. R., N. R. JONES, M. AGNEW, C. M. GOODESS et al. (2017): Climate Change and Future Pollen Allergy in Europe. Environmental Health Perspectives 125 (3): 385-391.

LOHMEYER W. & H. SUKOPP (2001): Agriophyten in der Vegetation Mitteleuropas. Erster Nachtrag. Braunschweiger Geobotanische Arbeiten 8:179-220.

ROLOFF A. (2013): Stadt- und Straßenbäume der Zukunft: welche Arten sind geeignet? ProBaum 3/2013: 6-11.

SCHOENBERG W., H. H. POPPENDIECK & K. JENSEN (2014): Urbane Ökosysteme & Klimawandel in der Metropolregion Hamburg (MRH) in der Querschnittsaufgabe Naturschutz. *http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2014/32760/pdf/Q2_positionspapier_urbane_oekosysteme.pdf* (Abgerufen am 26.10.2019).

SCHOLTE J. E. & F. SCHAFFNER (2007): Waiting for the tiger: establishment and spread of the Aedes albopictus mosquito in Europe. In: Takken, W. & B. G. J. Knols (eds.): Emerging pests and vector-borne diseases in Europe. Band 1, Wageningen Academic Publishers.

Kontakt:
Dr. Tom Steinlein
Universität Bielefeld – Fakultät für Biologie
tom.steinlein@uni-bielefeld.de

Steinlein T. (2019): Klimawandel und invasive gebietsfremde Arten in Städten. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 166-169. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.24.

5.3 Veränderungen von Flora und Fauna in Frankfurt am Main in den letzten 200 Jahren

Georg Zizka & Indra Starke-Ottich

Großstädte in Mitteleuropa sind aufgrund ihrer Lebensraumvielfalt in der Regel artenreicher als vergleichbare Gebiete im ländlichen Raum. Flora und Fauna unterliegen ganz besonders in den Städten einer ständigen Veränderung: Arten verschwinden, andere kommen hinzu. Die Einwanderung oder Einschleppung von neuen Arten geschieht meist durch die Tätigkeit des Menschen bzw. wird erst durch diese ermöglicht. In Städten wie Frankfurt besteht ein erheblicher Teil der Pflanzenarten aus solchen „Neubürgern". Viele eingewanderte oder eingeschleppte Pflanzen- und besonders Insektenarten stammen aus wärmeren Regionen. Trotz der neu eingewanderten Arten hat die Gesamtartenzahl in den letzten 200 Jahren abgenommen. Bei den in Frankfurt erloschenen Pflanzen lässt sich kein eindeutiger Bezug zur Erwärmung herstellen, entscheidend dafür waren bisher die unmittelbaren Eingriffe des Menschen, insbesondere Veränderungen in der Landnutzung.

***Changes in the Flora and Fauna of the City Frankfurt/Main in the last 200 years:** Due to their diversity of biotopes, large cities in Central Europe usually house a higher species diversity than rural areas of comparable size. Flora and fauna are highly dynamic, with species disappearing or being introduced continuously. Appearance of new species in an area is in almost all of the cases due to the impact of man. In cities like Frankfurt/Main, a substantial part of the plant species growing outside cultivation is formed by these introduced or alien species. Many alien plant or animal species, especially insects, originate from regions with a warmer climate. In spite of many introduced species, the total plant species diversity has substantially decreased in the last 200 years in Frankfurt. Considering the plants, that have disappeared in Frankfurt in the last centuries, there is no case that can unequivocally be attributed to warmer climate. The basic causes are changes in agriculture and forestry.*

Frankfurt am Main ist mit rund 741.000 Einwohnern (2017) die fünftgrößte Stadt Deutschlands. Von der Fläche des Stadtgebietes von 248,3 km² nehmen Grün- und Freiflächen 39,4 % ein, der Rest entfällt auf Siedlungs- (37,6 %) und Verkehrsflächen (20,9 %) sowie Gewässer (2,1 %). Die Stadtfläche liegt zwischen 88 und 212 m Meereshöhe, die Durchschnittstemperatur beträgt 11,1 °C, die Summe der Jahresniederschläge im Mittel der letzten Jahre 625 mm (Stadt Frankfurt am Main 2018). In Deutschland steht Frankfurt mit rund 3.000 Einwohnern pro km² auf Platz sieben der am dichtesten besiedelten Städte. Die Bevölkerung der Großstädte wächst weltweit an, so auch in Frankfurt in den letzten 10 Jahren um rund 111.000 Menschen (Wikipedia). Trotz der dichten Besiedlung und des daraus resultierenden massiven menschlichen Einflusses weist Frankfurt, wie viele mitteleuropäische Großstädte, eine höhere Vielfalt an Pflanzenarten auf als eine vergleichbare Fläche im angrenzenden ländlichen Raum. Großstädte wie Frankfurt sind Zentren (»Hotspots«) der Biodiversität, dies liegt an der Vielfalt der Lebensräume, die von naturnahen Bereichen wie Wäldern über landwirtschaftliche Nutzflächen bis hin zu Parks, Friedhöfen und Privatgärten reicht. Der Bestand an Pflanzen-, Tier- und Pilz-Arten unterliegt einer großen Dynamik, die sich aber in der Regel unserer direkten Beobachtung entzieht. Am ehesten wird das neue Auftreten oder die starke Vermehrung von auffälligeren Wirbeltieren wahrgenommen, z.B. von Nil- oder Kanadagänsen, Halsbandsittichen oder vom Biber. In der Regel muss man wissenschaftliche Sammlungen, Archive und Publikationen bemühen, um die Ausbreitung von Arten genau zu rekonstruieren, vielfach fehlen solche Informationen zur Ausbreitungs- oder Aussterbegeschichte aber. Für den Bestand der wild, also nicht kultiviert vorkommenden Arten von Blütenpflanzen (Angiospermen) in Frankfurt haben wir eine außerordentlich gute Datenlage sowohl über den aktuellen Zustand als auch über die Entwicklung in den letzten 200 Jahren. Die Analyse des Herbarium Senckenbergianum, seiner historischen Aufzeichnungen zur Pflanzenwelt und der Literatur im Senckenberg Forschungsinstitut Frankfurt erlaubte es Ottich (2007) und Gregor et al. (2012), die Veränderungen des Artenbestandes zu beziffern und Ursachen des Wandels in der Pflanzenwelt zu identifizieren. Umfangreiche Informationen zur Flora und ihrer Dynamik bietet auch die »Flora von Frankfurt« im Internet (*www.flora-frankfurt.de*).

Städtische Flora

Grundsätzlich unterscheidet man bei den dauerhaft in einem Gebiet vorkommenden Pflanzenarten die Einheimischen, Indigenen oder Idiochoren, die ohne Zutun des Menschen in ein Gebiet gelangt sind, von denjenigen, die ihr Vorkommen in einem Gebiet der Tätigkeit des Menschen verdanken (Adventivpflanzen oder Anthropochoren). Bei letzteren differenziert man noch zwischen Alteinwanderern oder Archäophyten (Einwanderung vor 1492) und Neueinwanderern oder Neophyten (Einwanderung nach 1492).

Die Zahl der Blütenpflanzen im Stadtgebiet Frankfurt lag nach aktuellem Kenntnisstand um 1800 bei 1.263 Arten, davon 948 Einheimische, 237 Altein-

wanderer und 78 Neueinwanderer. Um 1900 war die Zahl auf 1.226 Arten gesunken (886 Einheimische, 228 Altweinwanderer, 112 Neueinwanderer). Bis zum Jahr 2019 lässt sich ein noch stärkerer Rückgang auf 1.129 Arten verzeichnen (694 einheimische, 176 Alteinwanderer, 259 Neueinwanderer). Wir haben also insgesamt eine Abnahme der Pflanzenvielfalt, besonders bei den einheimischen Arten und in geringerem Umfang bei den Alteinwanderern, während die neu eingewanderten Pflanzen stark zugenommen haben (Gregor et al. 2012). In *Tab. 5.3-1* sind die Zahlen aus dem Jahr 2019 für die Frankfurter Blütenpflanzenflora zusammengestellt. *Tab. 5.3-1* zeigt auch, dass seit 1800 weit über 300 Arten verschollen sind, die ehemals regelmäßig in Frankfurt vorkamen.

Warum sind so viele Arten verschwunden? Hier sind vor allem der Nutzungswandel in der Land- und Forstwirtschaft (Intensivierung und Modernisierung der Landwirtschaft, Aufgabe der Waldweide), die Begradigung der Flüsse und die Absenkung des Grundwasserspiegels bzw. Trockenlegung von Feuchtgebieten zu nennen. Dadurch sind Lebensräume für viele, auch bundesweit seltene Arten verschwunden. Hinzugekommen in Form der Neophyten sind besonders Kulturfolger (»Unkräuter«) aus aller Welt und Zierpflanzen, die aus der Kultur entkommen und dann auch ohne Unterstützung des Menschen an anderen Standorten gedeihen können. Die Biodiversität in den mitteleuropäischen Großstädten ist zwar gemessen an der Artenzahl hoch, ähnelt sich aber zwischen den Städten immer mehr durch den wachsenden Anteil weit verbreiteter Arten.

Städtische Fauna

Wie verhält es sich bei anderen Organismengruppen? Die Fischfauna in Main und Nidda umfasste früher 38 einheimische Arten, darunter Stör und Lachs. Im 20. Jahrhundert ging die Vielfalt wegen der starken Gewässerverschmutzung auf nur vier Arten zurück. Inzwischen ist die Zahl der Fischarten in Frankfurt wieder auf über 30 gestiegen, darunter 25 einheimische und sieben neu eingewanderte Arten (Neozoen) (Korte 2015). Zurückzuführen ist das auf die jahrzehntelangen, erfolgreichen Anstrengungen zur Verbesserung der Wasserqualität und den Rückbau von Wehren und kanalisierten Flussbereichen. Dies sind sicher auch wichtige Gründe für die Rückkehr eines Säugetiers wie des Bibers nach Frankfurt, auch ein Bericht über eine aktuelle Sichtung des Fischotters im Stadtgebiet Frankfurt liegt vor.

2015 hatte sogar der Wolf wieder das Frankfurter Stadtgebiet erreicht – und wurde gleich nahe der Abfahrt Frankfurt-Eckenheim auf der A661 überfahren. Ganz sicher bietet eine Großstadt wie Frankfurt keinen geeigneten Lebensraum für Tiere wie Wolf, Luchs und Wildkatze, die alle große Reviere mit naturnahen Lebensräumen benötigen.

Bei den Tagfaltern konstatieren Zub & Nässig (2015) einen gravierenden Rückgang der Artenzahl für Frankfurt. Bei den Libellen sind bzw. waren mit 49 nachgewiesenen Arten etwa ¾ aller in Hessen vorkommenden Arten im Stadtgebiet zu finden. Sechs Arten davon kommen heute wahrscheinlich in Frankfurt nicht mehr vor, andere Arten sind erst in neuerer Zeit aus wärmeren Regionen, z. B. dem Mittelmeergebiet, bei uns eingewandert (Hill & Malten 2015). Bei den in neuerer Zeit eingewanderten Insekten handelt es sich häufig um Arten aus wärmeren Gebieten, die ihr Areal nach Norden erweitern. Solche »Neubürger« in Fauna und Flora nehmen wir meistens gar nicht wahr, zunächst sind sie auch selten. Für Schlagzeilen sorgen eingewanderten Arten, wenn sie für die Gesundheit des Menschen oder anderer verbreiterter Organismen relevant sind oder sein können. Hier wären aktuell z. B. die Asiatische Tigermücke *Aedes albopictus* (Heimat: Ostasien), die Rosskastanien-Miniermotte, *Cameraria ohridella* (Balkan), der Buchsbaum-Zünsler *Cydalima perspectalis* (Ostasien) oder der für das Eschentriebsterben verantwortliche Pilz *Hymenoscyphus fraxineus* (Ostasien) zu nennen.

Tab. 5.3-1: *Zusammensetzung der Flora von Frankfurt ohne apomiktische (Klein-)Arten und ohne nur vorübergehend auftretende Arten (Ephemerophyten) (Stand August 2019).*

Aktueller Artenbestand		
Idiochore	*694*	*61,5%*
Anthropochore - Archäophyten	*176*	*15,6 %*
Anthropochore - Neophyten	*259*	*22,9%*
Gesamt	***1.129***	***100%***
Verschollene Arten (früher für Frankfurt nachgewiesen, heute nicht mehr vorkommend)		
Idiochore	*256*	*75,3%*
Anthropochore - Archäophyten	*64*	*18,8%*
Anthropochore - Neophyten	*20*	*5,9%*
Gesamt	***340***	***100%***

Ländliche Biodiversität

Wie hat sich die Artenvielfalt im ländlichen Raum entwickelt? Die Datenlage dazu ist schlechter als für Städte, aufgrund umfangreicher Herbaraufsammlungen aus dem Zeitraum ab 1945 lassen sich jedoch für ein rund 100 km von Frankfurt liegendes Gebiet (Gemeinde Feldatal im Vogelsberg) genauere Aussagen zur Dynamik der Blütenpflanzen machen. Für diese ländliche Region ist ebenfalls ein Artenrückgang festzustellen, der vor allem



Abb. 5.3-1: *Gleisflächen beherbergen häufig eine vielfältige Flora mit zahlreichen anthropochoren Arten, in einigen Fällen erfolgt auch die Ausbreitung von Arten entlang dieser Verkehrswege. Auf der Abbildung sind mehrere Exemplare des strauchförmigen Sommerflieders (*Buddleja davidii*) zu erkennen. Die aus Ostasien stammende Art findet sich heute regelmäßig und in großer Zahl wildwachsend in der Stadt, ist aber erst seit wenigen Jahrzehnten für Frankfurt dokumentiert (Foto: Indra Starke-Ottich).*



Abb. 5.3-2: *Manche neu eingewanderten Arten sind »invasiv«, d.h., sie breiten sich rasch aus und treten in großer Zahl auf. Zwei solche Vertreter sind das Schmalblättrige Greiskraut (*Senecio inaequidens*, gelbblütig, im Vordergrund) und das Schmalfrüchtige Weidenröschen (*Epilobium brachycarpum*; rötliche, reich verzweigte Pflanzen im Mittelgrund). Obwohl heute in Frankfurt sehr häufig, ist das aus Südafrika stammende Greiskraut erst seit 1988 für Frankfurt belegt. Die* Epilobium*-Art stammt aus Nordamerika und wurde sogar erst 2004 neu in Frankfurt gefunden. Im Hintergrund der charakteristische Frankfurter Messeturm (Foto: Indra Starke-Ottich).*

wieder auf die Intensivierung der Landwirtschaft zurückgeführt werden kann. Die Zahl der neu eingewanderten Arten (Neophyten) ist erwartungsgemäß geringer als in der Großstadt Frankfurt (Gregor et al. 2016).

Erstaunlicherweise fehlen in Mitteleuropa für dicht besiedelte und gut erforschte Gebiete – so auch für Frankfurt – immer noch viele Daten zur Biodiversität, z. B. zu vielen Insektengruppen, zu Würmern, zu Protisten und ganz allgemein zu den Organismen im Boden. Große Fortschritte bei der Kenntnis der Pilzvielfalt in Frankfurt gibt es erst in den letzten Jahren. Durch intensive Forschung stieg die Zahl der aus Frankfurt bekannten Pilzarten von 998 im Jahr 2015 (Lotz-Winter et al. 2015) auf 1.528 im Jahr 2019 (Kruse & Lotz-Winter 2019). Dieser Unterschied in der Artenzahl kommt nicht etwa durch neu eingewanderte Pilzarten zustande, sondern illustriert den schlechten Kenntnisstand noch vor wenigen Jahren: das Vorkommen vieler Arten war für das Stadtgebiet vorher noch nicht dokumentiert worden. Für die Pilze gibt es inzwischen auch fundierte Schätzungen, die von einer Gesamtartenzahl von weit über 2.000 im Stadtgebiet ausgehen (Kruse & Lotz-Winter 2019). Da aber historische Daten hier weitgehend fehlen, wird eine Rekonstruktion der Entwicklung der Frankfurter Pilzvielfalt in den vergangenen Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten wohl auch in Zukunft nicht möglich sein.

In vielen Organismengruppen haben wir im städtischen Raum einen Artenrückgang zu verzeichnen, der bisher vor allem auf die Eingriffe des Menschen, insbesondere Nutzungsänderungen, zurückzuführen ist. Bei einigen Insekten aus wärmeren Gebieten, bei denen eine kontinuierliche Ausdehnung ihrer Verbreitungsgebiete nach Norden auch Frankfurt erreicht hat, lässt sich ein Bezug zum allgemeinen Klimatrend (Erwärmung) herstellen. Bei den Pflanzen können wir aber bisher in Frankfurt kein neues Vorkommen eindeutig auf eine Erwärmung des Klimas zurückführen, ebenso wenig wie das Verschwinden von Arten. Die in den Medien vieldiskutierten Extremereignisse, insbesondere die heißen, trockenen Sommer 2018 und 2019, zeigen dagegen eindeutig auch bei Pflanzen in der Stadt große Wirkung – davon zeugt die erschreckend hohe Zahl wegen Trockenheit abgestorbener alter Buchen im Stadtwald. Weitere schwerwiegende Folgen haben in Stadtwald und Parks das Diplodia-Triebsterben der Kiefer (*Pinus sylvestris*) und die Rußrinden-Krankheit der Ahorn-Arten (*Acer pseudoplatanus* und *Acer platanoides*). Beides wird durch Pilze verursacht (*Sphaeropsis sapinea* bzw. *Cryptostroma corticale*), das große Ausmaß der Schäden in 2019 auf eine Schwächung der Bäume durch die Extremsommer zurückgeführt. Starke Wirkung zeigen auch die ohnehin unter Stress stehenden Stadtbäume, die in Grünanlagen, Fußgängerzonen und an Straßenrändern auf Extremstandorten wachsen (Massing et al. 2019). Hier stieg die Zahl der Stadtbäume, die in Frankfurt gefällt werden mussten, in 2019 stark an. Es zeichnet sich auch ab, dass altbewährte Stadtbaumarten in Zukunft durch andere, trockenresistentere ersetzt werden müssen. Punktuelle Beobachtungen deuten auch darauf hin, dass einige wildwachsende Arten in höherer Abundanz auftreten (z. B.

Acer platanoides) bzw. sich stärker selbst verjüngen, wie z.B. die Walnuss (*Juglans regia*). Solche Verschiebungen in der Häufigkeit von Arten unterliegen aber natürlich auch jährlichen Schwankungen und lassen sich nur genauer an Hand von Dauerbeobachtungsflächen untersuchen. Diese fehlen im urbanen Raum in der Regel.

Die Frage, wie das Klima in unseren Städten in einigen Jahrzehnten sein wird, beschäftigt die Menschen immer stärker, seit die Zahl der heißen Tage und besonders der »Tropennächte« (>20 °C) zunimmt und in den sich stark aufheizenden und nur langsam abkühlenden »Betonwüsten« Hitzephasen zu merklichen gesundheitlichen Belastungen besonders für ältere Menschen führen. In diesem Zusammenhang wird richtig auf die große Bedeutung von Stadtnatur für die Abschwächung dieser Hitzeperioden verwiesen. Stadtbäume und Grünflächen werden in Zukunft noch wichtiger werden, ebenso die Begrünung aller geeigneten Flächen im bebauten Bereich, also von Dächern und Hausfassaden. Dabei ist zu bedenken, dass der positive Einfluss von Stadtnatur auf das Stadtklima (z. B. Beschattung, Abkühlung, Luftfilterung) nicht zwingend mit Artenvielfalt, z. B. der Pflanzen, verknüpft ist. Diese spielt aber eine Rolle für den Erholungswert und auch für die Stabilität der Lebensräume. Damit die Stadtnatur möglichst alle Ökosystemleistungen bereitstellen kann, müssen beide Aspekte berücksichtigt werden.

In den stark wachsenden Großstädten spielen Fragen der Nutzungsform und -intensität für die Erhaltung bzw. Veränderung der Biodiversität auch heute noch eine größere Rolle als der Klimawandel. In vielen Städten – so auch in Frankfurt – existieren im Randbereich (noch) landwirtschaftlich genutzte Flächen. Auf diesen Flächen sind durch Intensivierung und moderne Anbaumethoden zwar die Erträge gesteigert worden, die Biodiversität ist dagegen stark zurückgegangen. Hier könnte durch Extensivierung und Verbesserung des Strukturreichtums wieder Lebensraum für dort einstmals verbreitete Arten geschaffen werden. Die zweite Nutzungsänderung ist die Bebauung bisher nicht versiegelter Flächen für Wohnen, Gewerbe und Verkehr. Aufgrund der stark anwachsenden Stadtbevölkerung besteht ein großer Druck für diese Flächennutzung. Ein Blick in die Geschichte Frankfurts zeigt, dass die Flora der artenreichen Kalkstandorte im Wesentlichen der Bautätigkeit zum Opfer gefallen ist (Stich et al. 2019).

Literatur

GREGOR T., D. BÖNSEL, I. STARKE-OTTICH & G. ZIZKA (2012): Drivers of floristic change in large cities – A case study of Frankfurt/Main (Germany).- Landscape and Urban Planning 104: 230-237.

GREGOR T., S. DRESSLER, K. U. NIERBAUER & G. ZIZKA (2016): Loss of plant species diversity in a rural German region – assessment on basis of a historical herbarium/Der Rückgang der Pflanzendiversität in einer ländlichen deutschen Region - eine Rekonstruktion anhand einer Herbarsammlung.- Tüxenia 36: 191-204.

HILL B. T. & A. MALTEN (2015): Libellen – bedrohte Kunstflieger. In: Starke-Ottich I., D. Bönsel, T. Gregor, T. Malten, C. Müller & G. Zizka (Hrsg.): Stadtnatur im Wandel – Artenvielfalt in Frankfurt am Main.- Kl. Senckenberg-Reihe 55: 46-54.

KORTE E. (2015): Fische – stilles Leben in Frankfurter Gewässern. In: Starke-Ottich I., D. Bönsel, T. Gregor, T. Malten, C. Müller & G. Zizka (Hrsg.): Stadtnatur im Wandel – Artenvielfalt in Frankfurt am Main.- Kl. Senckenberg-Reihe 55: 66-73.

KRUSE J. & H. LOTZ-WINTER (2019): Neues zur Frankfurter Pilzvielfalt – Mehr als 1.500 Pilzarten im Stadtgebiet! In: Starke-Ottich I. & G. Zizka (Hrsg.): Stadtnatur in Frankfurt – vielfältig, schützenswert, notwendig.- Senckenberg-Buch 82: 76-93.

LOTZ-WINTER H., H. SANDAU & M. PIEPENBRING (2015): Überraschende Vielfalt: Pilze in Frankfurt am Main.- In: Starke-Ottich I., D. Bönsel, T. Gregor., A. Malten, C. Müller & G. Zizka (Hrsg.): Stadtnatur im Wandel - Artenvielfalt in Frankfurt am Main.- Kl. Senckenberg-Reihe 55: 83-105.

MALTEN A., C. MÜLLER & G. ZIZKA (Hrsg.) (2015): Stadtnatur im Wandel - Artenvielfalt in Frankfurt am Main.- Kl. Senckenberg-Reihe 55: 83-105.

MASSING F., H.-P. WESTPHAL, I. STARKE-OTTICH & G. ZIZKA (2019): Hitze, Salz und Autos – Stadtbäume im Stress. In: Starke-Ottich I. & G. Zizka (Hrsg.): Stadtnatur in Frankfurt – vielfältig, schützenswert, notwendig.- Senckenberg-Buch 82: 31-40.

OTTICH I. (2007): Archäophyten und Neophyten im Stadtgebiet von Frankfurt am Main und ihre Auswirkungen auf die Biodiversität.- 759 S.; Dissertation, Fachbereich Biowissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt am Main.

STADT FRANKFURT AM MAIN (2018): Statistisches Jahrbuch Frankfurt am Main 2018.- Stadt Frankfurt am Main; Frankfurt.

STARKE-OTTICH I., D. BÖNSEL, T. GREGOR, T. MALTEN, C. MÜLLER & G. ZIZKA (Hrsg.) (2015): Stadtnatur im Wandel – Artenvielfalt in Frankfurt am Main.- Kl. Senckenberg-Reihe 55: 1-253.

STICH K., I. STARKE-OTTICH, D. BÖNSEL & G. ZIZKA (2019): Pflanzen der Kalkstandorte – Bestandsaufnahme nach 100 Jahren.- In: Starke-Ottich I. & G. Zizka (Hrsg.): Stadtnatur in Frankfurt – vielfältig, schützenswert, notwendig.- Senckenberg-Buch 82: 69-75.

WIKIPEDIA: Liste der Großstädte in Deutschland.- URL: *https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Gro%C3%9Fst%C3%A4dte_in_Deutschland*. Zugriff 26.9.2019

ZUB P. & W. NÄSSIG (2015): Schmetterlinge – Vielfalt einst und jetzt. In: Starke-Ottich I., D. Bönsel, T. Gregor, T. Malten, C. Müller & G. Zizka (Hrsg.): Stadtnatur im Wandel – Artenvielfalt in Frankfurt am Main.- Kl. Senckenberg-Reihe 55: 55-64.

Kontakt:
Prof. Dr. Georg Zizka
gzizka@senckenberg.de
Dr. Indra Starke-Ottich
Indra.Starke-Ottich@senckenberg.de
Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum Frankfurt

Zizka G. & I. Starke-Ottich (2019): Veränderungen von Flora und Fauna in Frankfurt am Main in den letzten 200 Jahren. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 170-173. www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.25.

5.4 Stadt und Land - Gewässer im Wandel

Heike Zimmermann-Timm & Katrin Teubner

Gewässer prägen die Landschaft und gestalten auch das Bild unserer Städte und Gemeinden. Im urbanen Raum müssen Fließgewässer unterschiedliche Funktionen erfüllen. Diese Funktionen, so zeigt die Geschichte, unterliegen einem historischen Wandel, der von der Beziehung Mensch-Wasser geprägt ist. Obgleich die Gewässer mit der EU-Wasserrahmenrichtlinie zunehmend in den Fokus gerückt sind, ist die überwiegende Zahl der Gewässer in keinem guten Zustand. Der Klimawandel und die Urbanisierung wirken als zusätzliche Stressoren, welche die Funktionalität gefährden. Gleichwohl kann festgestellt werden, dass sich die Gewässer zunehmender Beliebtheit im Stadtbild erfreuen, gleichzeitig kommt es zur schleichenden Aufgabe öffentlichen Raums zugunsten privaten Eigentums.

The City and the Country - Urban Waters in Transition: *Waters shape the landscape as well as the image of our cities and communities. In urban areas, watercourses have to fulfill different functions, which are subject to historical change marked by the relationship between man and water. Although the waters under the EU Water Framework Directive have increasingly come into focus, the majority of the waters are not in good shape. Climate change and urbanization act as additional stressors that endanger the rivers' functionality. Nevertheless, the waters have enjoyed increasing popularity in the cityscape, even as the public space is being gradually abandoned in favor of private property.*

Aquatische Ökosysteme im städtischen Raum

Städtische Ökosysteme rücken wieder in den Fokus (Gilbert 1989, Sukopp & Wittig 1998), obgleich sie nur 3% der Erdoberfläche einnehmen. Die Bevölkerungszunahme in den Ballungsräumen und der Klimawandel stellen eine starke Belastung in den vom Menschen überformten und belasteten Systemen dar. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Gewässer im urbanen europäischen Raum.

Begriffsbestimmung

Stadtgewässer oder urbane Gewässer sind Steh- und Fließgewässer, die den charakteristischen Einflüssen von menschlichen Siedlungen unterliegen, im Gegensatz zu den Gewässern in der freien Landschaft.

»Der Begriff Stadtgewässer beschreibt verschiedenartige limnische Systeme, die durch ihre Lage in urbanen Ballungszentren gekennzeichnet sind. Im Bereich der stehenden Gewässer sind neben natürlich entstandenen Kleingewässern, Teiche und Seen auch Parkgewässer und Regenrückhaltebecken zu nennen, als Fließgewässer sind Entwässerungsgräben, Kanäle und Flüsse, z.T. mit Hafenbecken aufzuführen« (Gunkel 1991, S. 124). Demnach beinhalten urbane Gewässer unterschiedliche Gewässertypen, die durch eine intensive Nutzung geprägt sind. Schumacher (1991, S. 17) schreibt »Urbane Fließgewässer sind also der Bach und der Fluss in der Stadt, die den speziellen Einflussgrößen dieses höchst naturfernen Raumes unterliegen«.

Gewässer des urbanen Typs sind nicht zwingend auf einen städtischen Raum beschränkt. Siedlungsgebiete können auch auf ober- und unterhalb gelegene Abschnitte in hydrologischer, struktureller, ökologischer und funktioneller Hinsicht Einfluss nehmen, die somit Merkmale urbaner Gewässer aufweisen. Der Übergang zwischen urbanen Gewässern und solchen in der freien Landschaft ist daher fließend. In der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie werden urbane Gewässer den Kategorien der künstlichen und der erheblich veränderten Oberflächengewässer zugeordnet. Als künstliche Wasserkörper gelten dabei alle »von Menschenhand geschaffenen Gerinne, die zur Wasserkraftnutzung, Schifffahrt, Hochwasserabfuhr oder Be- und Entwässerung angelegt wurden und nicht Teilstrecke eines natürlichen, regulierten Wasserlaufs sind. Erheblich veränderte Wasserkörper dagegen sind Gewässer natürlichen Ursprungs, die infolge physikalischer Veränderungen durch Eingriffe des Menschen in ihrem Wesen stark modifiziert wurden. Ein Gewässer wird dann als erheblich verändert ausgewiesen, wenn es hydromorphologisch deutlich verändert ist und mehr als 30% des Uferstreifen besiedelt sind, bzw. industriell genutzt werden. Das trifft auf Gewässer im städtischen Bereich zu (EU-WRR 2000).

Historie

Die Geschichte der urbanen Gewässer ist von einem Funktionswandel geprägt, der die Beziehung Mensch-Gewässer wiederspiegelt:

- Anfänge der Stadtentwicklung bis Mitte des 19. Jahrhunderts:

  - Siedlungen entstanden am Wasser und prägten die wirtschaftliche und politische Entwicklung. Es bestand eine Verknüpfung zwischen Mensch, Stadt und Gewässer (Energiegewinnung, Transport, Trink- und Brauchwasser, Abwasser, Schutz).

  - Industrialisierung bis Ende des 20. Jahrhunderts: Fließgewässer wurden begradigt oder (z.T. auch unterirdisch) kanalisiert und dienten in erster Linie der Entsorgung industrieller und kommunaler Abwässer. Der Mensch wendet sich vom Gewässer ab.

- Renaturierung und Revitalisierung von den 1970er Jahren bis heute:

Ökologische Aspekte prägten ab den 1970er Jahren den Umgang mit Gewässern. Der Ausbau von Reinigungsanlagen sowie der Einsatz neuer Klärtechniken gewann an Bedeutung. Flüsse und Bäche wurden renaturiert, neue Kleingewässer wurden geschaffen und als Gestaltungselement in den städtischen Raum integriert, (historische) Gewässer wurden wiederhergestellt (*Abb. 5.4-1*) oder Gebäude in Wassernähe errichtet (*Abb. 5.4-2*). Der gesellschaftliche Wandel gen Freizeitgesellschaft führte wieder zu einer engeren Vernetzung von Mensch und Wasser

Gewässerqualität:

Die Mitgliedsstaaten der EU hatten sich im Jahr 2000 darauf geeinigt bis 2015 für alle Gewässer einen »guten Zustand« zu erreichen. Viele Maßnahmen wurden getätigt, aber diese reichten nicht aus, die Frist wurde schließlich bis 2027 verlängert. Problematisch sind nach wie vor der Ausbau und die Begradigung, sowie der diffuse Eintrag von Dünger und Pestiziden aus der Landwirtschaft. Zudem belasten Nano- und Mikroplastikpartikel sowie andere Spurenstoffe zunehmend die Gewässer.

Charakteristika urbaner Gewässer

Aus den anthropogenen Einflüssen ergibt sich eine Reihe von hydrologischen, ökologischen, strukturellen und funktionalen Merkmalen, die typisch für urbane Gewässer sind.

Stehgewässer

Natürliche urbane Seen inmitten von Städten sind häufig Teil von Überschwemmungsgebieten der Flussauen und damit meist flache Seen. Die Durchmischungen selbst in der warmen Jahreszeit erfolgt meist vollständig bis zum Grund (polymiktische Gewässer), wodurch sie sich von tiefen Seen unterscheiden. In flachen urbanen Seen verändern die Austauschprozesse am Seegrund (Grenzschicht Sediment-Wasser, z.B. Kleeberg et al. 2013), meist ohne Zeitverzögerung, die Eigenschaften oberflächennaher Wasserschichten: in der Tiefe rückgelöste Nährstoffe mischen sich in die lichtdurchfluteten oberflächennahen Wasserschichten und sind für das Algenwachstum wieder sofort verfügbar.

Ein spezifischer Gewässertyp unter den polymiktischen Seen sind stark durchflossene Flußseen im urbanen Bereich. Sie sind Erweiterungen von Flussabschnitten, die kein deutlich ausgeprägtes Seebecken bilden, sich aber wegen der längeren Verweilzeit des Wasserkörpers, etwa 3-30 Tage, von einem typischen Flussabschnitt unterscheiden.

Diese Verweilzeit beeinflusst entscheidend die Ökologie der im freien Wasser lebenden Organismen eines Gewässers, nämlich ob sich ein Flussplankton oder ein »echtes« Seenplankton ausprägen kann. Während Algenzellen sich bei guter Nährstoffverfügbarkeit einmal am Tag teilen und so bereits bei geringer Verweilzeit des Wassers rasch Algenbiomasse aufbauen können, benötigt das Durchlaufen der Entwicklungsstadien vom Zooplankton meist mehr Zeit. Das Zooplankton unterliegt somit der Gefahr, ausgewaschen zu werden, bevor es sich fertig entwickelt hat.

In der Nähe von Siedlungsgebieten künstliche errichtete Gewässer, wie Fischteiche, Kiesgruben, naturnahe Badeseen und Gartenteiche, bauen ein Plankton auf, das mit dem eines natürlichen Sees funktional vergleichbar ist. Schwimmteiche sind anders zu bewerten, da dort die Entwicklung des Zooplanktons technisch unterbunden wird. Während in einem urbanen Gewässer mit einem »echten« Seeplankton das Algenwachstum in zweierlei Hinsicht reguliert wird, nämlich »von unten« über die den Algen zur Verfügung stehenden Nährstoffe (»bottom up« Effekt) und »von oben« über den Fraß des Zooplanktons (»top down« Effekt), wird



Abb. 5.4-1: *Der historische Hafen der Stadt Bad Karlshafen wurde wiederhergestellt (April 2019). Foto: Heike Zimmermann-Timm.*



Abb. 5.4-2: *Tradition trifft Moderne – Hamburgs neuer Stadtteil, die Hafencity mit Elbphilarmonie (Fertiggestellt 2017). Foto: Susanne Barkmann.*

das Algenwachstum in den Schwimmteichen nur »bottom up« gesteuert. Ein naturnahes urbanes Gewässer ist gegen Störungen über weite Bereiche abgepuffert, wogegen ein Schwimmteich eher instabil ist, d.h. permanent von technischen Regulationen abhängig.

Fließgewässer

Hydrologisch betrachtet sind Fließgewässer Gerinne, in denen der oberirdische Abfluss in Abhängigkeit der Geländemorphologie transportiert wird, beeinflusst von Geochemie und Vegetation. Entstehungsort sind oberirdische Grundwasseraustritte und Seen. Die Aufenthaltszeit des Wassers ist kurz, der Niederschlag und das Einzugsgebiet bestimmen den Abfluss. »Urbane Fließgewässer sind also der Bach und der Fluß in der Stadt, die den speziellen Einflußgrößen dieses höchstnaturfernen Raumes unterliegen« (Schuhmacher 1991, Seite 17). Während ein Stadtbach oft gänzlich »stadttypisch« verändert ist, spiegelt sich im Fluss häufig nur eine graduelle städtische Beeinflussungen (z.B. chemisch-physikalische und biologische Parameter) wieder. Die städtischen Fließgewässer wurden hinsichtlich der Morphologie verändert, d.h. begradigt, vertieft, z.T. in Betonhalbschalen gelegt oder anderweitig befestigt. Absturzbauwerke wurden eingebaut, um das Gefälle herzustellen und zusätzliche Maßnahmen (z.B. Tieferlegung, trapezförmige Erweiterung, Rückhaltebecken) konstruiert, um Hochwasserspitzen aufzufangen. Eine Verzahnung mit dem Umland ist nicht gegeben. Stadtbäche sind häufig schwer zu finden, da Quellen versiegt sind, Bachabschnitte überbaut oder verrohrt wurden. In den städtischen Fließgewässern ist die Hydrologie gestört, da es keine hydrologische Beziehungen zwischen Niederschlag, Einzugsgebiet und Abfluss gibt. Zusätzlich verhindert die dichte Bebauung und Versiegelung von Oberflächen die Grundwasserbildung. Die Folgen sind lange Phasen von unnatürlichen Niedrigwasser und stoßartige Hochwasserwellen.

Kanäle, Grachten und Fleete

Künstlich geschaffene Wasserstrassen sind Stillgewässer, Wasserbewegung kommt nur durch fahrende Schiffe und die damit einhergehende Sog- und Schwallbewegung im Uferbereich zustande. Charakteristisch sind der technische Ausbau und der hohe Gehalt von suspendierten partikulären Material. Zum Zwecke der Schiffbarkeit werden Kanäle regelmäßig gepflegt (z.B. Baggern, Entfernung von Makrophyten). In wenigen Städten ist ein System von Grachten erhalten, die dem Lastentransport dien(t)en oder auch die Abwasserentsorgung unterstütz(t)en. Fleete sind gezeitenbeeinflusste Kanalsysteme in Städten (*Abb. 5.4-2*).

Hafen

Hafenbecken sind Ihrem Zweck entsprechend durch technischen Ausbau entstanden, Wasserbewegungen kommen vor allem über den Schiffsverkehr sowie mancherorts auch über den Gezeiteneinfluss zustande. Die Becken sind Sedimentfallen und müssen regelmäßig geräumt werden (Schumacher 1998).

Gewässer und Eutrophierung

Stehgewässer

Nährstoffanreicherungen, meist gekoppelt an einen unmittelbaren Biomassezuwachs von Phytoplankton, Makrophyten oder Phytobenthos, werden als Eutrophierung bezeichnet. Eine über Jahre allmähliche Nährstofferhöhung in öffentlichen urbanen Gewässern bleibt entweder lange Zeit unentdeckt oder wird geduldet. Die Eutrophierung per se definiert nicht, welcher Nährstoff sich im Gewässer anreichert.

Generell sind vier Hauptnährelemente für das Algenwachstum notwendig: Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Phosphor (P) und Silizium (Si). Liegen diese Elemente in einen ökologischen Stöchiometrieverhältnis von 106:16:1:17 vor (Teubner & Dokulil 2002), kann man annehmen, dass ein ausgewogenes Wachstum der Algen erfolgen kann, weil die Nährstoffressourcen der optimalen elementaren Zusammensetzung ihrer Biomasse entsprechen (Teubner & Dokulil 2002). Da man bei Stadtgewässern davon ausgehen kann, dass immer genügend gelöster Kohlenstoff im Wasser vorhanden ist, bleiben Si, N und P kritisch für die Entwicklung von Algen. Generell sind nur die gelösten Fraktionen dem Algenwachstum verfügbar: Silikat für Si, hauptsächlich Nitrat-Stickstoff und Ammonium-Stickstoff für N und gelöstes Phosphat für P. Als Faustregel dauert die »turnover Zeit«, die Zeitspanne bis ein in der Biomasse gebundenes Nährelement wieder verfügbar freigesetzt wird, für das Silizium Wochen bis Monate, für den Stickstoff Tage bis Wochen und für den Phosphor Stunden bis Tage. Um eine für einen Stadtsee aussagekräftige Beziehung zwischen Nährstoffkonzentration und Algenbiomasse aufzuzeigen, sollten daher für Si das Silikat, für N das Nitrat oder auch der Gesamt-Stickstoff (TN) und für P der Gesamt-Phosphor (TP) bewertet werden.

Ein »mehr« an Silikat in urbanen Gewässern infolge der Substitution von Phosphat in Waschmitteln (phosphatfrei seit 1986), hat sich bisher nicht negativ ausgewirkt. Kiesel- und Goldalgen sind Teil der Planktongemeinschaft und brauchen für ihren Zellaufbau unbedingt Si. Höhere Silikatkonzentrationen stimulieren daher das

Wachstum dieser Algen, die saisonal vorwiegend im Frühjahr und Herbst wachsen. Viele dieser für ein urbanes Ökosystem unproblematischen Algen haben eine außerordentlich hohe Affinität Phosphat aufzunehmen. Silikathaltige Algen binden P und verlagern diesen in das Sediment, wodurch zumindest zeitweise, selbst im Sommer, die P-Verfügbarkeit für andere Algen reduziert ist – ein wesentlicher Aspekt insbesondere für Badegewässer. Die Problematik Eutrophierung reduziert sich somit eigentlich auf den Eintrag von N und P in urbanen Gewässern, um eine hohe Wassergüte für die vielfache Nutzung der Gewässer im Siedlungsbereich zu gewährleisten.

Vollenweider-Modelle dienen der Beschreibung des Ausmaßes der Eutrophierung in urbanen stehenden Gewässern und legen Trophie-Grenzwerte fest. Sie beziehen sich auf die Frühjahrssituation, wenn die Algenbiomasse »ungestört«, entsprechend der über den Winter angesammelten Nährstoffe (TP, TN), »auswachsen« kann (»bottom-up« Effekt). Nach einer linearen Abhängigkeit tritt bei hohen Nährstoffkonzentrationen eine Sättigung auf: trotz einer weiteren Nährstoffanreicherung bleibt die Bildung einer adäquat höheren Algenbiomasse aus, weil andere Faktoren wie z.B. Lichtmangel im algentrüben Wasserkörper dann wachstumsbegrenzend sind. Urbane Gewässer, sprechen auf zusätzlichen Phosphateintrag besonders sensitiv an (weil Stickstoff über die Landwirtschaft und andere Abwässer vielfach im Überschuss vorliegt, vgl. urbane Alte Donau, Teubner et al. 2018a). Eine weit im Überschuss zugegebene Menge an Stickstoff bleibt unbemerkt, d.h. ohne Begleitung einer unerwünschten Algenmassenentwicklung, solange der P-Gehalt zuverlässig niedrig (limitierend) ist. Sobald etwas mehr P (P1) hinzukommen würde, würde sich aufgrund des übermäßig hohen N-Pools (N16) eine rasante Algenentwicklung (C106) ergeben.

Je nach Landesbezug (Standards wie DIN-Norm oder ÖNORM) gelten verschiedene Trophie-Grenzwerte: ein urbaner mesotropher See, wie z.B. der Große Müggelsee (z.B. Behrendt & Opitz 1996), wird seinem natürlichen Referenzzustand eines Flachsees im Tiefland gerecht (mesotroph = mäßiger Nährstoffgehalt), nicht aber ein mesotroph-alpiner See mit einem per se extrem nährstoffarmen Referenzzustand.

Übermäßige Nährstoffzufuhr, die über den Referenzstatus eines urbanen Sees hinaus geht, verwandelt das Gewässer in einen extremen Standort: eine reduzierte Biodiversität und Massenentwicklungen von problematischen Cyanobakterien (potenzielle Toxinbildner) sind die Folge. Der urbane Flachsee Alte Donau ist ein Erfolgsbeispiel langfristiger Sanierungsmassnahmen (Teubner et al. 2018a, 2018b), wo nachhaltig einer Verbesserung der Wasserqualität zurück zu dem mesotrophen Zustand gelang und somit ökosystemare Leistungen wieder gewährleistet sind.

Seit 2000 wird der Gesundheitsstatus eines Gewässers über die Bioindikation von Lebensgemeinschaften bestimmt (EU-WRR 2000). Der zugrunde liegende Zusammenhang liegt hier in der Ökophysiologie der Lebenswelt eines Sees. So können z.B. bestimmte Algen sich nur in nährstoffarmen Gewässern gut entwickeln und werden bei Nährstoffzuwachs von nährstoffliebenden Arten massiv verdrängt.

Fließgewässer

Die Phosphor- und Stickstoffeinträge in Fließgewässern haben sich, wie oben beschrieben, durch die Einführung phosphatfreier Waschmittel, Produktionsstilllegungen, Bau und Modernisierung kommunaler und industrieller Kläranlagen (Phosphatfällung) sowie den höheren Anschlussgrad von Siedlungen an die Abwasserreinigung deutlich verringert. Die Hauptquelle der Nährstoffbelastung der Gewässer ist heute die Landwirtschaft, aber auch kommunale Kläranlagen, Kraftwerke, Verkehr und Industriebetriebe tragen zur Nährstoffbelastung bei.

Die Stickstoffeinträge in die Oberflächengewässer in Deutschland lagen 2012-2014 bei 487.000 t/Jahr, im Vergleich zum Zeitraum 1983-1987 beträgt die Minderung ca. 50%. Dies ist überwiegend auf den Rückgang der Stickstoffeinträge aus Punktquellen (kommunale Kläranlagen und industrielle Direkteinleiter) und durch die verbesserte Reinigungsleistung der Kläranlagen zurückzuführen. Die Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen gingen um 35% zurück. 51% des Stickstoffs wurden 2012-2014 über das Grundwasser in Oberflächengewässer eingetragen. Mit ca. 75% dominieren die Stickstoffeinträge die Oberflächengewässer.

Die Phosphoreinträge in die Oberflächengewässer in Deutschland betrugen im Jahr 2012-2014 ca. 23.000 t/Jahr. Gegenüber dem Vergleichszeitraum 1983-1987 ist dies eine Reduzierung um 72%. Auch dies ist überwiegend auf die Verringerung der Einträge aus Punktquellen zurückzuführen (87%). Trotz der deutlichen Verringerung der Einträge aus Punktquellen hatten diese 2012-2014 noch einen Anteil von 34% an den Gesamteinträgen. Die Verminderung der Einträge aus urbanen Flächen (Mischkanalisationsüberläufe und Trennkanalisation, nicht angeschlossene Einwohner an kommunale Kläranlagen oder Kanalisation) hat an der Reduktion der diffusen Einträge den größten Anteil.

Bei den diffusen Pfaden dominieren für Phosphor neben den urbanen Flächen die Einträge über das Grundwasser mit 21% der Gesamteinträge, gefolgt von den Einträgen über die Erosion mit 16%. Die Phosphoreinträge aus der Landwirtschaft betragen etwa 50% der gesamten Phosphoreinträge. Die Verringerung der Einträge spiegelt sich in einer Abnahme der Konzentrationen in den Gewässern wider. Die Konzentrationen der Phosphor- und Stickstoffverbindungen werden durch die Abflussverhältnisse beeinflusst. Während die Konzentrationen von Gesamtphosphor und Ammonium-Stickstoff bereits Anfang der 1990er Jahre zurückgingen, setzte bei Nitrat-Stickstoff erst ab Mitte der 1990er Jahre eine Reduzierung ein. Diese ist geringer als bei Gesamtphosphor und Ammonium-Stickstoff.

Die Phosphor- und Stickstoff-Konzentrationen liegen aber immer noch nicht überall in den Bereichen, die ein Erreichen eines guten ökologischen Zustands/Potenzials ermöglichen (vgl. UBA 2017).

Auswirkungen des Klimawandels

Stehgewässer

Während bei dem Langzeiteffekt Eutrophierung gefragt wird WIE VIEL Algenbiomasse sich in Abhängigkeit zunehmender Nährstoffkonzentrationen in einem Gewässer gebildet hat, werden Langzeiteffekte durch den Klimawandel oft über die Frage beantwortet, WANN bestimmte Ereignisse im See von Jahr zu Jahr erfolgten. Die Beobachtung zur sogenannten Phänologie von Ereignissen können heute klimarelevant ausgewertet werden. Solche Ereignisse im See sind beispielsweise der Tag im Jahr beginnender Eisschmelze oder des Minimums der Wassertemperatur, der Tag maximaler Algenbiomasse im Frühjahr, Sommer oder Herbst oder des sogenannten Klarwasserstadiums bzw. die Anzahl der Tage mit Überschreitung hoher Wassertemperaturen im Sommer. Ob solche phänologische Beobachtungen in einem See klimabedingt erfolgen, kann mittels Klimaindex geprüft werden. Der auf der nördlichen Halbkugel häufig relevante Klimaindex ist der North Atlantic Oscillation Index (NAO-Index), der aus der Druckdifferenz zwischen Azoren und Island berechnet wird. Wenn es einen korrelativen Zusammenhang zwischen den lokalen Wetterparametern und dem globalen Klimaindex gibt, liegt die Vermutung nahe, dass das Wetter klimaabhängig verläuft. So sind für Österreich beispielsweise sogenannte NAO-positive Jahre, d.h. Jahre wo der NAO-Index deutlich positiv von dem langjährigen Mittel abweicht, sehr heiße und zugleich trockene Jahre. Umgekehrt NAO-negative Jahre sind kühle und feuchte Jahre. Ein Beispiel verschiedener Klimaeffekte kann anhand einer Langzeitstudie an der urbanen Alten Donau in Wien gezeigt werden (Teubner et al. 2018b). Der Einfluss der Klimaerwärmung lässt sich hier aus dem statistischen Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur im Winter und Frühjahr und dem Klimasignal im Winter (NAODJFM) klar ableiten. Der stärkste Anstieg der Oberflächenwassertemperatur ergibt sich in der zweiten Hälfte des Monats April, nämlich um 1,52 °C pro Dekade. Bezüglich Seenphänologie biologischer Prozesse kann ein um eine Woche per Dekade verfrühtes Klarwasserstadium im Frühjahr abgelesen werden (kurzweiliger Moment klaren Wassers infolge minimierter Schwebealgenbiomassen bedingt durch hohen Fraßdruck des Zooplanktons). Die Periode extrem erwärmten Wassers (über 22 °C Wassertemperatur an der Seeoberfläche) verlängert sich um 10,5 Tage pro Dekade im Sommer. Mit der Verlängerung der warmen Jahreszeit können immer häufiger das Medusenstadiums von wärmeliebenden Süßwasserquallen (*Craspedacusta sowerbii*, Neobiota s. auch *Tab. 5.4-1*) in der Alten Donau beobachtet werden.

Wärmeliebende Arten setzen sich in den Seen im Zuge der Klimaerwärmung zunehmend durch. Die Klimaerwärmung kann scheinbar paradox in besonderen Situationen auch kälteliebende Arten fördern, die sich in einem kurzen Zeitfenster aufgrund des plötzlichen Ausbleibens anderer Arten nischenhaft in Massen entwickeln (Beispiel Großer Müggelsee, Shatwell et al. 2008). Die zeitlichen Verschiebungen der saisonalen Abfolge, wie z.B. eine Verfrühung der Ereignisse im Frühjahr und eine Verlängerung der Warmwasserperioden im Sommer, können letztendlich auch eine Veränderung in der Struktur der Biozönosen bewirken. Dagegen verblassen die Klimaeffekte im Herbst. Die Klimarelevanz für biologische Prozesse in urbanen Seen herauszuarbeiten, ist generell schwieriger als für physikalische Prozesse, da Temperatureffekte die biologischen Ausprägungen nur überlagern aber die physikalischen Eigenschaften im See direkt bedingen. Es zeigt sich weiter, dass Seen mit einem großen Einzugsgebiet, wie dies vornehmlich für viele flache Seen des Tieflandes zutrifft, insbesondere der Klimaerwärmung unterliegen. Darüber hinaus kann eine Erwärmung kleiner urbaner Gewässer durch die Wirkung städtischer Wärmeinseln lokal verstärkt werden (IPCC 2014).

Fließgewässer

Hydrologie: Der Grundsatz, dass ein Fluss sein Einzugsgebiet wiederspiegelt, trifft für urbane Gewässer nicht zu. Natürlicherweise entspricht die Wasserführung dem Quellabfluss, die Stadt saugt jedoch Grundwasser in ihr Trinkwassersystem (über Wasserscheiden hinweg) an, das somit aus anderen Einzugsgebieten

stammen kann und gibt es als Abwasser wieder in das Fließgewässer ab. Hinzu kommt, dass Niederschlag zu sporadischen und extremen Abflussspitzen führt, die durch Bebauung und Versiegelung von Flächen begünstigt werden. Retention und Verdunstung sind auf städtischen Böden eingeschränkt (z.B. versiegelte Flächen, trockene Böden, wenig Grünflächen). Daher läuft der Niederschlag unverzüglich über die Kanalisation dem nächsten Fließgewässer zu und erhöht kurzfristig den Abfluss, was erheblich Hochwasserfolgen haben kann, da dem stark verbauten Fließgewässer natürliche Retentionsräume fehlen. Für Deutschland wurde eine Zunahme von niederschlagsbedingten Hochwasserereignissen nachgewiesen. Die Zahl der extremen Hochwasserereignisse, hervorgerufen durch Starkregenereignisse, hat sich sogar verdoppelt.

Eine geringere Wassermenge und ein geringer Durchfluss wird in vielen Gewässern vor allem in den Sommermonaten beobachtet, was sich auf die Gewässertemperatur, den Sauerstoffgehalt und die aquatische Biozönose auswirkt.

Temperatur: Siedlungen befinden sich überwiegend im Mittel- und Unterlauf von Fließgewässern. Die mittleren Luft- und Wassertemperaturen sind miteinander korreliert und zeigen im Mittel- und Unterlauf tages- und jahreszeitlich bedingte Temperaturveränderungen, die flußabwärts geringer ausfallen.

In Deutschland hat sich die Lufttemperatur im Jahresmittel im Zeitraum 1881 bis 2015 um 1,4K erhöht. Es ist davon auszugehen, dass sich langfristig auch die Gewässertemperaturen der Oberflächengewässer erhöhen. Wann und in welchem Ausmaß dies geschieht, hängt von einer Vielzahl weiterer Faktoren ab, beispielsweise Wasserstand, Durchfluss, Uferbeschaffenheit (Beschattung), aber auch von der Bewirtschaftung der Gewässer, z.B. Kühlwassereinleitungen.

Untersuchungen der internationalen Kommission zum Schutz des Rheins zeigen, dass die Wassertemperaturen im Rhein durchschnittlich von 1978-2011 um 1,0-1,5K angestiegen sind. Die Wassertemperatur stieg dabei nicht kontinuierlich über diesen Zeitraum an, sondern geht auf einen Anstieg in den Jahren 1987 bis 1989 zurück, was mit der stark ausgeprägten Nordatlantischen Oszillation erklärt wird. Einen weiteren regional begrenzten, aber deutlichen Effekt erzeugen Wärmeeinleitungen durch Kraftwerke. Rund 60 Prozent der Wärmeeinleitungen in den Rhein ergaben sich 2010 im Oberrhein zwischen Karlsruhe und Worms. Die Temperaturerhöhung bis Mainz ist v.a. auf Wärmeeinleitungen auf dieser Strecke sowie zu einem geringen Anteil auf die natürliche Erwärmung zurückzuführen. Die tatsächlich gemessene mittlere Temperaturerhöhung bei Mainz liegt bei 1,4 K. Die Anzahl der Tage, an denen die Wassertemperatur über 22 °C lag,

Tab. 5.4-1: *Prognosen für Steh- und Fließgewässer im städtischen Raum.*

Faktor	Auswirkungen auf das Gewässer
Klima	Veränderung der Artenzusammensetzung Abnahme der Artenzahl Veränderungen in der Phänologie
Eutrophierung	Veränderung der Artenzusammensetzung Abnahme der Artenzahl Verschlechterung der Gewässerqualität
Arzneimittel, Pestizide u. a. Substanzen	Anreicherung im Gewässer Schädigung der aquatischen Organismen und ihrer Konsumenten
Nano- und Mikroplastik	Störung der natürlichen Räuber-Beute-Beziehung Ausbreiten von Krankheiten über Biofilme Störungen des Hormonsystems über Additive
Licht	Insektensterben
Neobiota	Verdrängung einheimischer Pfanzen- und Tierarten Ausbreitung wasserbürtiger Krankheiten
Wasservögel	Remobilisierung von Nährstoffen durch Gründeln Düngung durch Fütterung Verschlechterung der Gewässerqualität
Gewässermanagement	Habitatverlust und damit Rückgang der Arten Fehlen von Retentionsräumen Verschlechterung der Gewässerqualität Hochwasserrisiko

nahm im vergangenen Jahrzehnt deutlich zu (IKSR 2011). In Niedersachsen war im Sommer 2019 sogar geplant das Kernkraftwerk Grohnde (KWG) vom Netz zu nehmen, da die Weser drohte 26 °C zu übersteigen, womit kein Kühlwasser mehr hätte eingeleitet werden dürfen (Malcher et al. 2019).

Sauerstoff: Hohe Wassertemperaturen bedeutet niedrige Sauerstoffkonzentration und das wiederum bedeutet Stress für die im Wasser lebenden Organismen. Kommen dann noch weitere Faktoren hinzu, wie eine starke organische Belastung, dann werden kritische Werte, Sauerstoffkonzentrationen < 4 mg/Liter erreicht. In der Tide-Elbe treten in den Sommermonaten immer wieder »Sauerstofflöcher« auf, die durch das Absterben von Phytoplankton in der eingetieften Unterelbe erklärt werden.

Eine geringe Sauerstoffkonzentration bedingt außerdem die Rücklösung von Stickstoff und Phosphor aus dem Sediment (interne Düngung).

Nähr- und Schadstoffe: Die bekannteste Einwirkung von Siedlungen auf Gewässer ist das Einleiten von häuslichen und industriellen Abwässern. Häusliche Abwässer, die nicht der dritten Reinigungsstufe der Kläranlage unterliegen, sind durch ihren Gehalt an Phosphor und Stickstoff besonders geeignet die Primärproduktion zu fördern.

Problematisch sind sporadische Spitzen von Abwassereintrag in die Kläranlage, wie sie in fakultativ genutzten Gebieten (z.B. Ferienanlagen, Büro- und Industriegebiete) auftreten, oder auch durch Starkregenereignisse, die einen größeren Wasserdurchsatz in der Kläranlage herbeiführen.

Industrielle Abwässer müssen durch Vorbehandlungen schon vor der Einleitung in die Kläranlage behandelt sein. Trotzdem gibt es eine Reihe von Substanzen, die von den Kläranlagen nicht eliminiert werden.



Abb. 5.4-3: *Weite Teile des Rheins, hier bei St. Goarshausen, sind im Oktober 2018 trockengefallen. Foto: Heike Zimmermann-Timm.*

Durch verringerte Durchflüsse, wie sie in den Sommermonaten zuletzt auftraten, kann die Nähr- und Schadstoffkonzentration in belasteten Gewässern zur Überschreitung von Toleranzgrenzen führen.

Flora und Fauna: Über niedrige Wasserstände können besondere Lebensräume, z.B. Laichplätze nicht mehr erreicht werden (*Abb. 5.4-3*). Das Absinken des Wasserstandes sowie das Trockenfallen von Ufer- und Sohleabschnitten führt zur Beeinträchtigung von Fischpopulationen durch ein vermindertes Nahrungsangebot. Die ungewöhnlich hohe Dichte von Individuen auf kleinem Raum erzeugt einen weiteren Belastungsfaktor und erhöht das Risiko der Übertragung von Krankheiten. Sind einzelne Gewässerabschnitte ausgetrocknet, dann ist das Wanderverhalten eingeschränkt.

Die veränderte Fließgeschwindigkeit führt zu einer verstärkten Sedimentation, was eine Verdichtung des benthischen Lebensraumes herbeiführt. Damit ist der Rückzugraum für viele Benthosorganismen eingeschränkt.

Eine Zusammenstellung von Faktoren sowie deren Auswirkungen auf das Gewässer erfolgt in *Tab. 5.4-1*. Viele dieser Einflussfaktoren, aber auch natürliche Faktoren, interagieren, was das Erkennen von Kausalbeziehungen erheblich erschwert.

Ökosystemare und soziale Dienstleistungen urbaner Gewässer:

Der Begriff »Ökosystemdienstleistungen« (»Ecosystem Services«) beschreibt den vielfältigen Nutzen, den der Mensch tagtäglich aus den Ökosystemen seiner Umgebung zieht. Urbane Gewässer können bei entsprechender Gestaltung sowohl ökologische als auch ökonomische und soziokulturelle Funktionen übernehmen. Die wichtigsten ökosystemaren Dienstleistungen sind im folgendem zusammengefasst:

- Klimatische Funktion: Verdunstung, Strahlungsabsorption durch Wasserkörper und Vegetation sowie Entstehung und Durchzug von Frischluft sorgen für einen Temperaturausgleich.
- Lebensraum für Flora und Fauna: Gewässer bieten Lebens- und Rückzugräume für Pflanzen und Tiere bieten. Sie schaffen Wander- und Ausbreitungskorridore zwischen Stadt und Land.
- Trinkwasser: Circa 17 Prozent des über die öffentliche Wasserversorgung in Deutschland bereitgestellten Trinkwassers stammt aus Uferfiltration oder künstlicher Grundwasseranreicherung.
- Vorfluter: Einleitung von häuslichen Abwässern und Industrieabwässern (incl. Kühlwasser).
- Angeln und Aquaponik: Angeln und Fischerei stellen eine Möglichkeit der Ernährung dar. Zukünftig kön-

nen auch Aquaponik-Syteme für Urban Farming an Bedeutung gewinnen, indem sie Fische und Pflanzen vor Ort im Kreislauf produzieren.

- Transport: Viele Wasserstrassen sind wichtige Transportwege für Fracht- oder Personenverkehr. Ein Frachtschiff ersetzt 150 Lastwagen (Malcher et al. 2019). Schaden entsteht, wenn die Schiffbarkeit nicht mehr gewährleistet ist (*Abb. 5.4-3*).
- Pädagogische und umweltpsychologische Funktionen: Gewässer werden im Rahmen der städtischen Gestaltung häufig mit ökologischen und erlebnispädagogischen Aspekten verknüpft, womit sie auch die Umweltbildung befördern. Umweltpsychologen haben festgestellt, dass sich »Blauräume«, geprägt duch sichtbare, erlebbare, natürliche oder künstliche Wasserflächen, stressmildernd erweisen.
- Erholungs- und Freizeitraum: Zudem kann wassergebundener Sport oder auch uferbegleitende körperliche Betätigung werden.
- Kulturelle Funktion und soziale Funktion: Städtische Fließgewässer und gewässernahe Räume sind bedeutende Orte für soziale Begegnungen und Kommunikation.
- Elemente der Denkmalpflege: Gewässer und damit verbundene Bauwerke, wie Brücken und Wehre, stellen historische Elemente dar und können von großem denkmalpflegerischen Wert sein.
- Architektur: Sogenannte »Blauräume« gewinnen im Städtebau zunehmend für das Stadtklima an Bedeutung. Sie bieten Frischluftschneisen und können die Überwärmung in der Stadt abmildern sowie unverbaubare Ausblicke gewährleisten.

Ausblick

Die zunehmende Urbanisierung und der Klimawandel erfordern gerade auch in den Städten eine Entwicklung, die die Wohlfahrtswirkung des aquatischen Lebensraumes verbessert. Der Verzahnung der Gewässer mit dem Umland ist es geschuldet, dass es lokaler und regionaler (und z.T. auch großräumigere) Maßnahmen bedarf, um eine Funktionalität dauerhaft zu gewährleisten. Es braucht das Zusammenspiel auf unterschiedlichen räumlichen Skalen und unter Einbeziehung unterschiedlicher Sektoren, stets im Dialog mit Experten aus Wissenschaft und Technik. Der Weg der Kreislaufwirtschaft sollte dabei unbedingt verfolgt werden. Die Reduktion von Nährstoffen und Pestiziden im ländlichen Raum sollte unserer Einschätzung nach höchste Priorität erhalten.

Von Seiten der Politik gilt es alle Anstrengungen zu unternehmen, um eine informierte und konsenswillige Gesellschaft herbeizuführen mit dem Ziel Wasser als Gemeingut zu bewahren und gesundheitlichen sowie wirtschaftlichen Schaden zu minimieren.

Literatur

BEHRENDT H. & D. OPITZ (1999): Ableitung einer Klassifikation für die Gewässergüte von planktondominierten Fließgewässern und Flussseen im Berliner Raum und güteklassebezogener Zielvorgaben zur Nährstoffreduzierung im Berliner Gewässersystem. IGB, Heft 1: 1-26.

EU-WRR (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000.

GILBERT O. L. (1989): Städtische Ökosysteme. Neumann Verlag.

GUNKEL G. (1991): Die gewässerökologische Situation in einer urbanen Großsiedlung (Märkisches Viertel, Berlin). In: Schumacher, H. & B. Thiesmeier (Hrsg.), Urbane Gewässer, Westarp Wissenschaften: 122-174.

IKSR (2011): Warn- und Alarmplan Rhein 2010.

IPCC (2014): Klimaänderung 2015: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II, und III zum fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). In: Pachauri R. K. & L. Meyer (Hrsg.) IPCC, Genf, Schweiz, Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.

KLEEBERG A., A. FREIDANK & K. JOEHNK (2013): Effects of ice cover on sediment resuspension and phosphorus entrainment in shallow lakes: Combining in situ experiments and wind-wave modeling. Limnology and Oceanography 58: 1819-1833.

MALCHER I., A.-K. NEZIK & K. RUDZIO (2019): Läuft nicht. DIE ZEIT vom 1. August 2019.

SCHUMACHER H. (1991): Limnologische Vorgaben und Bewertungskriterien zur ökologischen Verbesserung urbaner Fließgewässer.- In: Schumacher, H. & Thiesmeier B. (Hrsg.), Urbane Gewässer, Westarp Wissenschaften: 16-37.

SCHUMACHER H. (1998): Stadtgewässer.- In: Sukopp, H. & Wittig, R., Stadtökologie, Gustave Fischer Verlag: 201-218.

SHATWELL T. O. M., J. KÖHLER & A. NICKLISCH (2008): Warming promotes cold-adapted phytoplankton in temperate lakes and opens a loophole for Oscillatoriales in spring. Global Change Biology 14.9: 2194-2200.

SUKOPP H. & R. WITTIG (1998): Stadtökologie.- Gustav Fischer.

TEUBNER K. & M. T. DOKULIL (2002): Ecological stoichiometry of TN:TP:SRSi in freshwaters: nutrient ratios and seasonal shifts in phytoplankton assemblages. Archiv für Hydrobiologie (now: Fundamental and Applied Limnology), 154 (84):625-646.

TEUBNER K., W. KABAS & I. E. TEUBNER (2018a): Phytoplankton in Alte Donau: Response to trophic change from hypertrophic to mesotrophic over 22 years. In: Dokulil M.T., K. Donabaum, K. Teubner (eds) - The Alte Donau: Successful restoration and sustainable management - An ecosystem case study of a shallow urban lake. Springer:107-147 DOI:10.1007/978-3-319-93270-5_9

TEUBNER K., M. GROSSSCHARTNER & I. E. TEUBNER (2018b): Response of zooplankton to restoration and climate warming in Alte Donau. In: Dokulil M. T., K. Donabaum & K. Teubner (eds) - The Alte Donau: Successful restoration and sustainable management - An ecosystem case study of a shallow urban lake. Springer:163-212 DOI:10.1007/978-3-319-93270-5_11.

UBA (Umweltbundesamt) (2017): Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung. Dessau-Roßlau.

Kontakt:

PD Dr. Heike Zimmermann-Timm
Institut für Ökologie, Evolution und Diversität
Goethe-Universität, Frankfurt am Main
zimmermann-timm@bio.uni-frankfurt.de

PD Dr. Katrin Teubner
Abteilung für Limnologie und Biologische Ozeanographie
Universität Wien (Wien, Österreich)
katrin.teubner@univie.ac.at

Zimmermann-Timm H. & K. Teubner (2019): Stadt und Land, Gewässer im Wandel. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 174-181. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.26.

5.5 Wasserknappheit in Megastädten am Beispiel Lima

Christian D. León & Hannah Kosow

Lima, die Hauptstadt Perus, ist eine typische Megastadt, in der die Ursachen der Wasserkrise zugleich in den natürlichen (klimatischen und demographischen) Gegebenheiten und den politisch-institutionellen Rahmenbedingungen liegen. Zuwanderung und Wirtschaftswachstum fallen mit einer nicht-nachhaltigen Nutzung von Wasser zusammen. Knapper werdende Wasserressourcen und häufiger auftretende Dürren als Folgen des Klimawandels verschärfen die Lage. Szenarien, die Klima-Projektionen mit verschiedenen gesellschaftlichen und technischen Annahmen über mögliche Wasserzukünfte kombinieren, zeigen auf, dass die zukünftige Wasserversorgung Limas stärker als vom Klimawandel selbst von Faktoren aus den Bereichen Governance, Management und Planung abhängig ist. Um die Wasserversorgung von Lima langfristig zu sichern, sind integrierte Maßnahmen-Mixe notwendig. Diese Maßnahmen müssen technische, gesellschaftliche und ökologische Aspekte gemeinsam betrachten. Ihre Umsetzung bedarf nicht nur Investitionen, sondern auch starker Leitbilder und Institutionen sowie der Kooperation aller Akteure des Wassersektors.

Water scarcity in megacities – the example of Lima: *Lima, the capital of Peru, is a typical megacity, in which a (potential) water crisis is caused at the same time by natural (climatic and demographic) as well as by political-institutional conditions. Migration and economic growth coincide with non-sustainable water use patterns. Climate change impacts, as increasing scarcity of water resources and more frequent droughts, exacerbate the situation. Scenarios combining climate projections with alternative societal and technical assumptions on possible water futures show that the future water supply of Lima depends more directly from factors regarding governance, management and planning – than from climate change itself. To assure the long term water supply of Lima, integrated policy-mixes are required. These policy-mixes need to jointly consider technical, societal and ecological aspects. Their realization requires not only investments, but also strong visions and institutions as well as the cooperation of all actors of the water sector.*

Wassersituation in Lima

Überall auf der Welt sind menschliche Siedlungen meist in der Nähe von Wasserquellen entstanden. Der Zusammenhang zwischen der Verfügbarkeit von Wasser und der Entwicklung von Städten scheint auf der Hand zu liegen. Umgekehrt müssten knappe Wasserressourcen demnach ein Hemmfaktor sein, so dass Städte gar nicht entstehen bzw. nicht weiterwachsen sollten. Dieser Zusammenhang besteht heute jedoch nicht mehr. Weltweit steigt die Anzahl der Städte weiter an und es entstehen Megastädte, d.h. Städte mit mehr als 10 Mio. Einwohner*innen, unabhängig von den vorhandenen Wasserressourcen. Das Weiterwachsen der Städte, auch z. B. in Wüstengegenden, hat einerseits mit der Anpassungsfähigkeit des Menschen an knappe Ressourcen zu tun, andererseits mit der Kreativität und Innovationsfähigkeit menschlicher Kulturen, Wasser tief aus dem Untergrund oder aus weiten Entfernungen zu beschaffen. Viele dieser in Wüsten gelegenen Städte stoßen jedoch an ihre Grenzen, wenn Zuwanderung und Wirtschaftswachstum zeitlich und örtlich mit einer nicht-nachhaltigen Nutzung von Wasser zusammenfallen. Knapper werdende Wasserressourcen und häufiger auftretende Dürren als Folgen des Klimawandels sind weitere Faktoren, die Wasserkrisen verschärfen. Dass zur Lösung dieser Problematik nicht nur Ingenieure gefragt, sondern auch Politik und Gesellschaft zunehmend gefordert sind, zeigt sich darin, dass bei Wasserkrisen oft von einer »Governance-Krise« (siehe z. B. Taylor & Sonnenfeld 2018) gesprochen wird.

Lima, die Hauptstadt Perus, ist ein typischer Fall für eine Megastadt, in der die Ursachen der Wasserkrise zugleich in den natürlichen (klimatisch-demographischen) Gegebenheiten einerseits und den politisch-institutionellen Rahmenbedingungen andererseits zu finden sind. An der durch die Wüste geprägten Westküste des pazifischen Ozeans gelegen, beherbergt Lima heute mittlerweile die Hälfte der Bevölkerung Perus (insgesamt leben in der Metropolregion von Lima und Callao rund 10,6 Mio. Menschen) und zieht weiterhin Menschen aus dem gesamten Land an. Ungeachtet unterschiedlich erfolgreicher politischer Bemühungen zur Dezentralisierung des Landes bleibt Lima das politische, kulturelle und wirtschaftliche Zentrum Perus. Wie ein Vergleich der Wasserreserven mit der Metropolregion Santiago de Chile zeigt, ist die Wassersituation in Lima besonders kritisch: Santiago de Chile hält für 7,5 Mio. Menschen ein Angebot von ca. 880 Mio. km³ Wasser vor (Daten von 2015 aus CEPALSTAT); Lima mit 10,6 Mio. Einwohnern dagegen nur 361 Mio. km³ (Autoridad Nacional del Agua 2018, S. 26).

Neben der verfügbaren Wassermenge insgesamt stellt bei genauerem Hinsehen vor allem auch die räumliche und zeitliche Verteilung des Wassers eine große Herausforderung für Planung und Management der Wasserressourcen dar. Da es in Lima praktisch nicht regnet, ist die Wasserversorgung hauptsächlich von den Niederschlägen und der Gletscherschmelze in den Anden abhängig. Diese werden größtenteils über drei Flüsse (Río Rímac, Río Lurin und Río Chillón) in die Stadt geleitet und in drei Wasserwerken (2 im Río Rímac und 1 im Río Chillón) mit einer Produkti-

onskapazität insgesamt 25 m³/s (La Atarjea: 17,5 m³/s; Huachipa: 5 m³/s und Chillón: 2,5 m³/s) zu Trinkwasser aufbereitet. Die Regenzeit im Hochland dauert jedoch nur wenige Monate an; sie beginnt im November-Dezember und endet bereits in den Monaten März-April. Folglich führen die Flüsse natürlicherweise nur während knapp sechs Monaten Wasser und können im Rest des Jahres nicht als Trinkwasserquelle genutzt werden. So muss beispielsweise das Wasserwerk im Río Chillón aufgrund des niedrigen Wasserstandes in 6 Monaten im Jahr abgeschaltet werden. Wasser aus schmelzenden Gletschern kann dies nicht ersetzen. Zudem zeigen Studien, dass die Gletscher in Äquatornähe in den letzten Jahrzehnten stark zurückgegangen sind und der »Maximum Peak«, also der Zeitpunkt, ab dem aufgrund der geschrumpften Gletscherfläche der Gesamtabfluss abnimmt, bereits überschritten sein könnte (Mishra et al. 2017). Der Beitrag der Gletscherschmelze in den Flüssen wird immer kleiner und beträgt mittlerweile weniger als 10 Prozent in der Trockenzeit (Schoolmeester & Verbist 2018, S. 56). Über die Förderung von Grundwasser kann dies nur begrenzt aufgefangen werden, so dass bereits in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts mit dem Bau von Stauseen, Kanälen und Tunneln im Andenhochland begonnen wurde. Von Bedeutung für die Trinkwasserversorgung sind die Stauseen in der Region Marcapomacocha, die natürlicherweise in das Einzugsgebiet des Río Mantaro auf die Seite des Amazonasbeckens entwässern würden, nun aber über den Transandino-Tunnel in das Rímac-Tal umgeleitet werden. In den Marca-Stauseen sind rund 236 Mio. km³ Wasser gespeichert, das sind 65 Prozent der Gesamtwasserreserven für die Stadt Lima. Damit wurde der natürliche Wasserlauf des Río Rímac so verändert, dass der Fluss das ganze Jahr über Wasser führt.

Neben technischen Herausforderungen, die durch Investitionen in graue Infrastruktur (d. h. der Bau von z. B. Stauseen, Kanäle, Wasserleitungen, Aufbereitungsanlagen) und entsprechende Betreibermodelle gelöst werden könnten, sind die politisch-institutionellen Rahmenbedingungen eine weitere – wenn nicht eine größere – Herausforderung für die Wassergovernance von Lima. Knackpunkt dieses bislang nicht zufriedenstellend gelösten Problems ist, dass das Flusswasser aus den Anden noch weiteren Zwecken als allein der Trinkwasserversorgung Limas dient. Das in den Anden in Stauseen gespeicherte Wasser wird gleichzeitig erstens für die Stromerzeugung genutzt, zweitens nutzt die Landwirtschaft das Wasser für die Bewässerung ihrer Felder zur Nahrungsmittelproduktion, drittens stellen die Flüsse für Bergbauunternehmen und Kommunen im Oberlauf des Flusses gleichzeitig eine Wasserquelle für Prozess- bzw. Trinkwasser und Senken für ihre Abwässer dar. Ein Blick auf die Akteurslandschaft, die mit Wassernutzungen in Lima in den Wassereinzugsgebieten der Flüsse Chillón, Rímac und Lurín eine Rolle spielen, verdeutlicht die Komplexität und Vielzahl möglicher Nutzungskonkurrenzen um die Wasserressourcen (*Abb. 5.5-1*).

Die verschiedenen Wassernutzer stimmen sich bisher in Bezug auf ihre Wassernutzungen kaum ab. Gleichzeitig sind auf staatlicher Seite eine Vielzahl unterschiedlicher Ministerien, nachgeordneten Behörden und Instituten auf den verschiedenen Ebenen

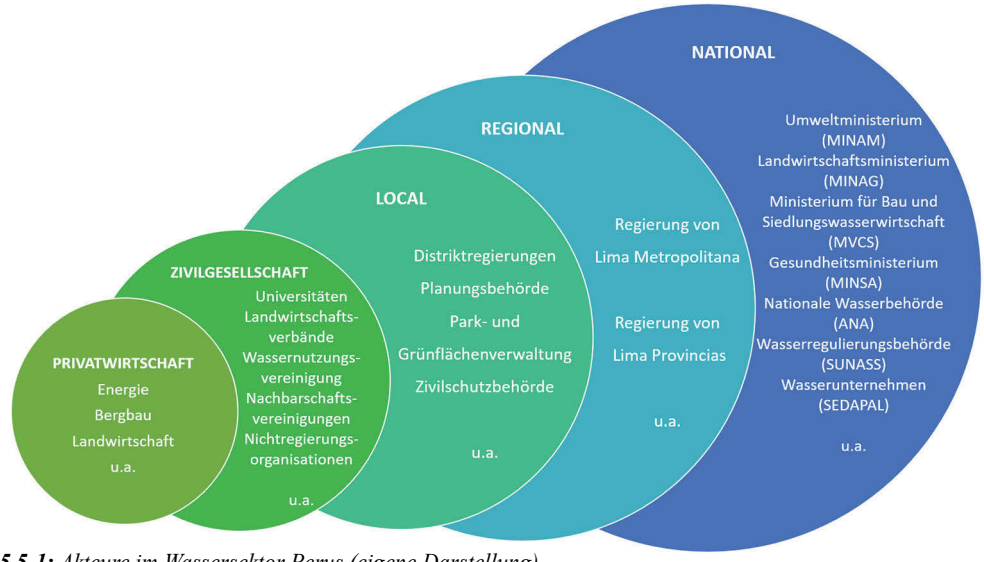


Abb. 5.5-1: *Akteure im Wassersektor Perus (eigene Darstellung).*

(national, regional, lokal) für Planung, Regulierung, Überwachung und Monitoring zuständig. Eine im Wassergesetz vom Jahr 2009 (»*Ley de Recursos Hídricos*«) für die Lösung dieser Aufgabe vorgesehene akteursübergreifende Plattform (»*Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca Interregional Chillón-Rímac-Lurín*, CRCH ChiRiLu«) wurde im Jahr 2016 eingerichtet, hat ihre Aktivitäten aber erst im Jahr 2018 aufgenommen. Aufgabe dieser neuen Plattform soll es sein, die Wasserbedarfe der unterschiedlichen Nutzer in einen Wasserbewirtschaftungsplan im Sinne eines integrierten Wasserressourcenmanagements aufzunehmen und die bisher zersplitterte Wassergovernance stärker zu bündeln.

Was sind die Folgen für die zukünftige Wassersituation in Lima?

Bei einer bereits schwierigen Ausgangslage stellt sich die Frage, welche Folgen sich für die zukünftige Situation der Wasserressourcen in Lima ergeben. Eine Antwort dazu hat das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung in den Jahren 2008 bis 2014 geförderte Forschungsprojekt »Lima-Water« in Form von Zukunftsszenarien gegeben. Im Rahmen von Lima-Water wurden die Folgen globaler Klimaszenarien auf die Wasserverfügbarkeit in den drei Flüssen (Chillón, Rímac, Lurín) modelliert. Dazu wurden drei unterschiedliche Klimaszenarien des IPCC ausgewählt und für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 die Änderungen in den Niederschlagsmengen modelliert (Schütze et al. 2019). Die Ergebnisse zeigen, dass die Niederschläge in den meisten Fällen insgesamt abnehmen werden, durchschnittlich um etwa 10 Prozent. Mit einem hydrologischen Abflussmodell wurde errechnet, dass der jährliche Abfluss, genauso wie die Niederschläge, im Durchschnitt ebenfalls abnehmen wird (s. *Tab, 5.5-1*) Dies wird auch vor dem Hintergrund erwartet, dass der »Maximum Peak« vermutlich bereits erreicht wurde, d.h. der Beitrag der Gletscherschmelze als immer weniger bedeutend angenommen werden kann. Eine Szenariorechnung hat jedoch überraschend ergeben, dass die Niederschläge und somit auch der Abfluss ggf. auch steigen könnten. Dies verweist auf die Unsicherheit, die mit den Abflussprojektionen für längere Zeiträume verbunden ist. Für die weitere Arbeit wurden daher unterschiedliche Varianten eines »trockenen« Klimawandels (d. h. mit einer Abnahme der Niederschläge bzw. Abflüsse) und eines »nassen« Klimawandels (d.h. mit einer Zunahme der Niederschläge bzw. Abflüsse) angenommen (*Tab. 5.5-1*).

Im nächsten Schritt wurden mittels eines partizipativen Prozesses unter Beteiligung von Akteuren, die im Wassersektor Limas eine wichtige Rolle spielen, die möglichen Folgen des Klimawandels mit weiteren 12 sozio-politischen und wasserrelevanten Faktoren untereinander in Beziehung gesetzt. Mithilfe einer in der Wissenschaft als »Cross-Impact Balance (CIB)« bezeichneten Analysemethode (Weimer-Jehle 2006) wurden als Ergebnis fünf integrierte Szenarien entwickelt, die mögliche alternative Zukünfte der Stadt Lima im Jahr 2040 beschreiben (Schütze et al. 2019, Kosow & León 2015) (*Abb. 5.5-2*)

Szenarien stellen definitionsgemäß keine Prognosen dar, sondern zeigen mehrere mögliche, alternative Zukunftsentwicklungen auf, in der keine der Entwicklungen wahrscheinlicher als die andere ist (zur Definition von Szenarien s. Kosow & Gassner 2008). Die Ergebnisse dieser Szenarioanalyse zeigen verschiedene mögliche zukünftige Wassersituationen für Lima im Jahr 2040. Augenfällig erscheint bei einer Betrachtung der obigen Szenarien der Einfluss des Klimawandels. Entgegen der Erwartungen kann die Situation der Wasserversorgung in Lima im Jahr 2040 sowohl bei einem besonders »trockenen« (d.h. weniger Niederschläge) als auch einem »nassen« Klimawandel (d. h. mit stärkeren Niederschlägen) insgesamt eher negativ (Szenario A),

Tab. 5.5-1: *Durchschnittliche monatliche Änderung im Abfluss für den Zeitraum 2011-2050 im Vergleich zum Durchschnitt der Jahre 1999-2008, berechnet mit dem hydrologischen Modell HBV und den Globalen Klimamodellen (GCM) Echam und Hadley für die SRES Klimaszenarien A1B, A2 und B1. Quelle: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart, verändert nach http://www.lima-water.de/en/pp1.html.*

IPCC SRES-Szenario	GCM-Modell	Prozentuale Änderung im Abfluss (in Klammern: Messstation)		
		Río Chillón (Obrajillo)	Río Rímac (Atarjea)	Río Lurín (San Damian)
A1B	Echam	-3,05	-4,80	-2,05
	Hadley	+4,69	+2,15	+5,30
A2	Echam	-12,08	-13,72	-10,59
	Hadley	-8,72	-11,50	-7,48
B1	Echam	-8,63	-9,83	-6,97

mittel (Szenarien B und C) oder positiv (Szenario D) sein. Bei genauer Analyse der Einflussbeziehungen zwischen den Faktoren wird erstens deutlich, dass beide Varianten der Klimaveränderung negative Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Wasserressourcen haben können. Zweitens zeigt sich, dass die zukünftige Wasserversorgung stärker als vom Klimawandel selbst, von Faktoren aus dem Bereich der Governance abhängig ist. Dies betrifft v. a. eine auf langfristige Planung ausgerichtete Politik, die u. a. eine integrierte Bewirtschaftungsweise der Wasserressourcen und eine nachhaltige Tarifgestaltung durchsetzt und ein auf Effizienz ausgelegtes Wasserunternehmen umfasst.

In Anbetracht dieser Szenarien können verschiedene technische und nicht-technische Lösungen analysiert und die Möglichkeiten ihrer Umsetzung kritisch diskutiert werden.

Wie kann die Wassersituation Limas sichergestellt werden?

Um mögliche Antworten zu finden, wie die zukünftige Wasserversorgung von Lima sichergestellt werden kann, reicht es nicht, allein technische Lösungen zu betrachten, sondern diese müssten gemeinsam mit politisch-institutionellen Lösungen bewertet werden. Erfolgt keine integrierte Betrachtung, sind die Wirksamkeit und v.a. die Langfristigkeit von durchgeführten Maßnahmen nicht gewährleistet: Technische Lösungen wie z. B. Kläranlagen für die sichere Entsorgung und Aufbereitung von Haushaltsabwasser, denen geschultes Betriebspersonal, öffentliche Aufmerksamkeit und politische Priorität sowie effektive Kontrollen und Durchsetzung von z. B. Grenzwerten fehlen, werden weder effektiv noch nachhaltig betrieben. Außerdem kann es kurz- und mittelfristig zu Konflikten zwischen verschiedenen Wassernutzern kommen, wenn deren unterschiedliche Bedarfe und Perspektiven nicht bei der Entwicklung von Antworten einbezogen wurden. In einem von 2017 bis 2020 laufenden BMBF-Verbundprojekt (»Trinkwasserversorgung in prosperierenden Wassermangelregionen nachhaltig, gerecht und ökologisch verträglich - Entwicklung von Lösungs- und Planungswerkzeugen zur Erreichung der nachhaltigen Entwicklungsziele am Beispiel des Wassereinzugsgebiets der Region Lima/Perú – TRUST«) (für einen Überblick s. León et al. 2019, Krauss et al. 2019) werden die Ziele der verschiedenen Wassernutzer und mögliche Maßnahmen zur Erreichung der verschiedenen Ziele zusammen berücksichtigt und mögliche konfliktfreie Maßnahmenpakete entwickelt. Die untersuchten Was-

	Szenario A: Schwierige klimatische Bedingungen verstärken schlechte Governance	Szenario B1: Die Wassereinzugsbehörde schwimmt gegen den Strom	Szenario B2: Das private Wasserunternehmen als Einzelkämpfer	Szenario C: Die Chancen der Akteure auf der mittleren Ebene	Szenario D: Klimaresilienz durch Governance
Klimawandel	Die Folgen des Klimawandels variieren zwischen drastischem Rückgang und Zunahme der Niederschläge und Abflüsse.			Angespannte Situation mit starken Dürreperioden.	Entwicklungen zwischen ‚trockenem' und ‚nassem' Klimawandel.
Stadtentwicklung, Bevölkerung	Bevölkerungszuwachs, ungeordnetes Wachstum der Stadt (vertikal und horizontal) und Armut.	Bevölkerungszuwachs, ungeordnetes Stadtwachstum und Armut bleiben bestehen.	Bevölkerungszuwachs, ungeordnetes Stadtwachstum und Armut bleiben bestehen.	Bevölkerungsdruck und Armut sind zurückgegangen, doch die Stadt wächst weiter ungeordnet.	Der Anstieg der städtischen Bevölkerung ist zurückgegangen. Das Wachstum der Stadt ist geordnet und geplant.
Wassergovernance	Schwache Governance der gesellschaftlichen Akteure (öffentliche und private), die für die Wasserwirtschaft verantwortlich sind.	Stärkung der Wassergovernance durch Beteiligung gesellschaftlicher Akteure am integrierten Flussgebietsmanagement.	Verbesserungen in der Wasserwirtschaft durch ein privates Wasserversorgungsunternehmen und eine verbesserte Wassertarifstruktur.	Stärkung der Wassergovernance durch integriertes Flussgebietsmanagement. Verbessertes Management des Wasserunternehmens.	Starke Governance-Strukturen für Koordination, Abstimmung und Planung auf allen Ebenen (lokal, regional und national).
Wasserinfrastruktur	Unzureichende Infrastruktur in Bezug auf Wassermenge und Wasserqualität.	Oberflächen- und Grundwasserquellen werden besser geschützt und die Bewirtschaftung der Stauseen verbessert.	Die Situation in Bezug auf Wasserquellen, Behandlung und Wiederverwendung von Abwasser ist verbessert, auch mittels Tarifen.	Verbesserung in den Bereichen Wasserquellen, Behandlung und Wiederverwendung von Abwasser.	Abgestimmte kommunale und sektorale Entwicklungspläne. Anpassungsstrategien sichern eine gut funktionierende Wasserinfrastruktur.

Abb. 5.5-2: *Szenarien »Lima 2040« (eigene Darstellung).*

sernutzer sind Haushalte, Tourismus, Landwirtschaft, Industrie sowie die wasserverbundenen Ökosysteme jeweils im ländlich geprägten oberen wie im städtisch geprägten unteren Einzugsgebiet. Ihre Ziele betreffen v. a. die sichere Versorgung mit Trinkwasser für den menschlichen Bedarf, mit Bewässerungswasser für Landwirtschaft und Grünflächen sowie mit Prozesswasser für die Industrie, sowie die sichere Entsorgung von kommunalen und industriellen Abwässern. Für jedes Ziel werden alternative zentrale Maßnahmenoptionen untersucht, die geeignet sein könnten, das jeweilige Ziel zu erreichen. So werden in Wissenschaft und Praxis beispielsweise die folgenden Optionen zur Versorgung der wachsenden städtischen Bevölkerung mit Trinkwasser vorgebracht und diskutiert:

- Versorgung über Grundwasser, d. h. über tiefe Grundwasserbrunnen, ggf. unterstützt durch künstliche Grundwasseranreicherung (MAR-Management Aqui fer Recharge),
- Versorgung über aufbereitetes Flusswasser,
- Versorgung über einen Transfer von Wasser aus anderen Flusseinzugsgebieten,
- Versorgung über unkonventionelle Wasserquellen:
  a) Meerwasserentsalzung
  b) Abwasseraufbereitung zu Trinkwasserqualität.

Insgesamt werden 14 Ziele mit insgesamt 47 zentralen Maßnahmen auf Ihre Wechselwirkungen, d. h. Synergien und Vorbedingungen bzw. konflikthafte und sich ausschließende Kombinationen, hin untersucht (vgl. Kosow et al. 2019). Hierzu wurden 30 Expert*innen, wie u. a. Hydrolog*innen, Ingenieur*innen, Politik-und Sozialwissenschaftler*innen, sowie lokale Stakeholder, wie Vertrete*innen des Wasserversorgers SEDAPAL, der lokalen, regionalen und nationalen Verwaltung und Behörden, der Landwirtschaft und der Industrie, sowie von im Umwelt- oder Sozialbereich engagierten NGOs interviewt. Zusätzlich haben die Experten den möglichen Einfluss von Governance-Kontexten und Klimaszenarien auf die Wirksamkeit der Maßnahmen bewertet sowie den Beitrag der einzelnen Maßnahmen auf das Erreichen des Nachhaltigen Entwicklungsziels Nr. 6 der Vereinten Nationen »Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle« bis zum Jahr 2030 eingeschätzt (Vereinte Nationen 2015).

Anschließend konnten verschiedene in sich widerspruchsfreie, wirksame und nachhaltige Maßnahmen-Mixe identifiziert werden, welche die Ziele aller Nutzer auf einmal erfüllen könnten. Dies bedeutet erstens: Es gibt theoretisch Lösungen für Lima, in denen alle Wassernutzer nicht nur kurzfristig, sondern auch mittelfristig zu ihrem Recht auf Wasser kommen können. Zweitens zeigen diese potentiell wirksamen Maßnahmen-Mixe, dass eine »Weiter so« Politik eher nicht erfolgreich sein kann. Stattdessen macht eine effektive und nachhaltige Wasserversorgung deutliche Veränderungen notwendig. Dies betrifft die Wahl und Umsetzung von technischen Optionen, z. B. eine deutliche Verbesserung in der Entsorgung und Klärung von Abwässern, sowie das Nutzen von sämtlichen verfügbaren Wasserressourcen über Fluss- und Grundwasser hinaus, wie z. B. aufbereitete Abwässer zur Bewässerung oder zur Anreicherung des Grundwasserkörpers, und ggf. auch die Zuleitung von Wasser aus anderen Einzugsgebieten.

Hierzu sind zweitens bestimmte Bedingungen notwendig, wie ein hohes Wissen und Bewusstsein für die (gesamte) Wassersituation und die verschiedenen möglichen Lösungen bei den verschiedenen lokalen, regionalen und nationalen Akteuren. Darüber hinaus eine generelle Wasser(spar)kultur, die sich nicht nur auf die Bevölkerung und ihre Privathaushalte beschränkt, sondern genauso von der öffentlichen Hand, der Industrie und der Landwirtschaft gelebt wird. Außerdem erfordern komplexe Maßnahmen, wie die Zuleitung von Wasser aus anderen Einzugsgebieten oder auch die Anreicherung von Grundwasser mit geklärten Abwässern, Mechanismen und Strukturen des Risiko- und Konfliktmanagements.

Diese Veränderungen betreffen schließlich auch die Verbesserung der Governance-Situation auf vier Dimensionen: Erstens eine verstärkte Entwicklung gemeinsamer Vision und Planung (z. B. über Wasserwirtschaftspläne und Raumplanung); zweitens das Stärken von Autorität (u.a. von der Stärkung der lokalen Wasserselbstverwaltung im andinen Hochland bis hin zur Stärkung staatlicher Regulierungs- und Kontrollbehörden), drittens die vermehrte Zusammenarbeit und Übernahme von Verantwortung durch die verschiedenen Akteure (z. B. durch eine erweitertes Mandat der akteursübergreifenden Plattform CRHC ChiRiLu) und schließlich einen Fokus auf die Erhöhung der Investitionen im Wassersektor (dies betrifft sowohl das Erschließen von neuen bzw. erweiterten Finanzierungsquellen wie auch eine sinnvolle Verwendung dieser Gelder über eine von allen akzeptierte Instanz). Insgesamt zeigen die Ergebnisse auf: Es gibt verschiedene Optionen, um integrierte und nachhaltige Lösungen zu entwickeln. Hierzu gilt es, politische Visionen zu entwickeln, Mehrheiten auszuloten und Allianzen zu bilden sowie gesellschaftliche Akzeptanz und Finanzierungsmöglichkeiten zu schaffen.

Fazit

Die Wasserversorgung der Megastadt Lima stellt eine Herausforderung dar, die unter den Bedingungen des Klimawandels sich noch verschärfen könnte. Es gibt mögliche Lösungsansätze – diese sind jedoch keineswegs einfach, sondern komplex und erfordern einen im dreifachen Sinne integrierten Ansatz:

- Lösungen sollten technische, soziale, politisch-institutionelle und ökologische Dimensionen gemeinsam betrachten - die beste technische Lösung nützt nur wenig, wenn sie nicht akzeptiert wird, nicht korrekt betrieben werden kann oder nicht nachhaltig ist.
- Akteure, wie verschiedene Nutzergruppen mit ihren unterschiedlichen Zielen und Prioritäten sowie Entscheider aus Politik, Verwaltung und Wirtschaft, sollten bei der Entwicklung von Lösungsstrategien und ihrer Umsetzung beteiligt werden.
- Im Sinne eines integrierten Einzugsgebietsmanagements (»Integrated Water Ressources Management IWRM«) (dazu z. B. GWP-TAC 2000) sollten Flusseinzugsgebiete von den Quellen, dem Ursprung der Flüsse in den Bergen, bis hin zur Mündung ins Meer betrachtet werden.

Ein Blick über Lima hinaus zeigt, dass ein integrierter Ansatz zentral ist, um die Wasserkrise wachsender Megastädte in Wüstenregionen generell zu meistern. Dieser integrierte Ansatz ist gleichzeitig umso wichtiger und umso herausfordernder, wenn Megastädte über Flusseinzugsgebiete versorgt werden, die sich über die Territorien verschiedener politischer Einheiten oder sogar Staaten erstrecken.

Die hier dargestellten Ergebnisse beruhen auf Forschungsarbeiten, die im Rahmen von zwei Forschungsprojekten durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurden: 1) Lima-Water, Förderkennzeichen 01LG0512A-E, im Rahmen der Fördermaßnahme Future Megacities (2008-2014), und 2) TRUST, Förderkennzeichen 02WGR1426A-G, im Rahmen der Fördermaßnahme Globale Ressource Wasser (2017-2020). Weitere Informationen auf den Webseiten *www.lima-water.de* und *www.trust-grow.de.*

Literatur

AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (2018): Estado situacional de los recursos hídricos en las cuencas Chillón, Rímac y Lurín 2016/2017 (*http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2902).*

GWP-TAC (2000): Integrated Water Resources Management. TAC Background paper No 4, Global Water Partnership- Technical Advisory Commitee Stockholm, Sweden.

LEÓN C. & H. KOSOW (2000): Integrated Water Ressource Management. TAC Background paper No 4, Global Water Partnership-Technial Advisory Commitee Stockholm, Sweden.

KOSOW H., C. LEÓN & Y. ZAHUMENSKY (2019): Water conflict and policy analysis: A new methodology to identify conflict free policy-mixes, GRoW- Mid-term Conference: Global analysis and local solutions for sustainable water resources management, 20-21.02.2019, Frankfurt am Main.

KOSOW H. & C. LEÓN (2015): Die Szenariotechnik als Methode der Experten- und Stakeholdereinbindung. In: Niederberger M. & S. Wassermann (Eds.): Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung. Springer VS, 217-242.

KOSOW H. & R. GASSNER (2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse. Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. WerkstattBericht Nr. 103, IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin.

KRAUSS M., M. HÜGLER, H. KOSOW, S. WASIELEWSKI, Y. ZAHUMENSKY, S. STAUDER, J. WIENHÖFER, R. MINKE & C. LEÓN (2019): Entwicklung von Trink- und Abwasserkonzepten in der Metropolregion Lima/Peru zur Unterstützung der Nachhaltigen Entwicklungsziele der Vereinten Nationen. In: Wasser und Abfall 07-08/2019, 42-48.

LEÓN C., H. KOSOW, Y. ZAHUMENSKY, M. KRAUSS M, S. WASIELEWSKI, R. MINKE, J. WIENHÖFER, F. RIESE, S. F. STURM, F. BRAUER, M. HÜGLER, J. GOTTWALT & D. RIEPL (2019): Solutions and planning tools for water supply and wastewater management in prosperous regions with water shortage. In: GRoW - Water as a Global Resource: Global Analyses and local solutions for sustainable water resources management; Conference proceedings, 28-31.

MISHRA A., K. VERBIST, J. DECKER, M. VERSCHUEREN & B. AVILA (2017): The Impact of glacier retreat in the Andes: international multidisciplinary network for adaptation strategies; accomplishment report, UNESCO (*https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000258168*).

SCHOOLMEESTER T. & K. VERBIST (Ed.) (2018): The Andean Glacier and Water Atlas. UNESCO and GRID-Arendal. (*https://www.grida.no/publications/407*).

SCHÜTZE M., J. SEIDEL, A. CHAMORRO & C. LEÓN (2019): Integrated modelling of a megacity water system – The application of a transdisciplinary approach to the Lima metropolitan area. In: Journal of Hydrology 573, 983-993. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.03.045 (*https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.045*).

TAYLOR P. L.& D. A. SONNENFELD (2018): Water crisis and governance. Reinventing collaborative institutions in an era of uncertainty, Routledge: London and New York.

VEREINTE NATIONEN (2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015.

WEIMER-JEHLE W. (2006): Cross-Impact Balances: A System-Theoretical Approach to Cross-Impact Analysis. Technological Forecasting and Social Change, 73:4, 334-361.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Christian D. León
christian.leon@zirius.uni-stuttgart.de
Dr. Hannah Kosow
hannah.kosow@zirius.uni-stuttgart.de
Universität Stuttgart
Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS)

León C. & H. Kosow (2019): Wasserknappheit in Megastädten am Beispiel Lima. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 182-187. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.27.

5.6 Entwicklung der Weltbevölkerung, Megastädte und Landflucht

José L. Lozán, Siegmar-W. Breckle & Hartmut Graßl

Ende 2018 lebten auf der Erde 7,67 Mrd. Menschen: 60% in Asien, 17% in Afrika, 10% in Europa, 8% in Lateinamerika & Karibik, 5% in Nordamerika und 0,5% in Ozeanien. Die Weltbevölkerung wächst im globalen Durchschnitt 1,2% pro Jahr. Das entspricht 2,5 Kindern je Frau. Bis 2100 soll die Weltbevölkerung nach DWS (2019) auf 10,9 Mrd. anwachsen. Davon werden 4,8 Mrd. in Asien und aufgrund der überdurchschnittlichen Geburtenrate 4,5 Mrd. in Afrika leben. Das sind 44,0% bzw. 41,3% der Weltbevölkerung. Die Bevölkerung Chinas wird von 1,40 auf 1,02 Mrd. (Geburtenrate 1,60) sinken. Indien wird mit 1,45 Mrd. Menschen als Folge einer höheren Geburtenrate (2,44) China überholen. Die Bevölkerung in Europa wird von 742 Mio. (2017) auf 653 Mio. im Jahr 2100 trotz Migration schrumpfen. In den 1950er Jahren lag der Anteil der Stadtbevölkerung weltweit bei 30%. Anfang 2007 war das Verhältnis Stadt- zu Landbevölkerung bereits 50:50. Diese Entwicklung setzte sich fort und seit 2018 leben über 55% der Menschen in Städten und 2030 werden es 60% sein. In Deutschland betrug die Stadtbevölkerung 1960 71,38% und 2017 schon 77,26%. In China ist die Landflucht weniger ausgeprägt. 2007 lebten nur 45,9% und 2017 58,5% in Städten. Mit der Landflucht nimmt gleichzeitig die Anzahl der großen Städte zu. 1950 gab es 20 Millionenstädte; im Jahr 2000 waren es 371 und 2018 bereits 548. 2018 war in 33 Städten die Bevölkerungszahl über der Zehn-Millionen-Grenze (Megastadt). Diese Entwicklung führt zu einer sehr hohen Bevölkerungsdichte. In Monaco und Macao leben rund 20.000 Menschen/km². In vielen armen Ländern führt diese Entwicklung oft zur Bildung von Elendsvierteln (Slums).

The development of the world population, megacities and rural exodus: *By the end of 2018, 7.67 billion people were living on Earth: 60% in Asia, 17% in Africa, 10% in Europe, 8% in Latin America & the Caribbean, 5% in North America, and 0.5% in Oceania. The world population is growing in global average 1.2% per year. That's equivalent to 2.5 children per woman. By 2100, according to DWS (2019), the world population is expected to grow to 10.9 billion. Of this, 4.8 billion will live in Asia and due to the above-average birth rate 4.5 billion in Africa. That is 44.0% and 41.3% of the world population. The population of China will fall from 1.40 to 1.02 billion (birth rate 1.60). India will overtake China with 1.45 billion people as a result of a higher birth rate (2.44). The population in Europe will shrink in 2100 from 742 million (2017) to 653 million despite migration. In the 1950s the urban population was 30% of the total world population. At the beginning of 2007, the ratio of urban to rural population was 50:50. This development continued and 2018 already 55% of the people lived in cities and in 2030 it will 60%. In Germany the urban population was 71.38% in 1960 and already 77.26% in 2017. In China, the urban migration is less pronounced. Only 45.9% lived in cities in 2007 and 58.5% in 2017. With the rural exodus the number of big cities is worldwide increasing as well. In 1950 there were 20 »million cities«; in 2000 371 and 2018 already 548. The number of cities with a population of 10 million or more (mega-cities) was 33 in year 2018. This development leads to a very high population density in some cities. In Monaco and Macao live around 20,000 people/km². In developing or emerging countries, this often leads to the formation of slums.*

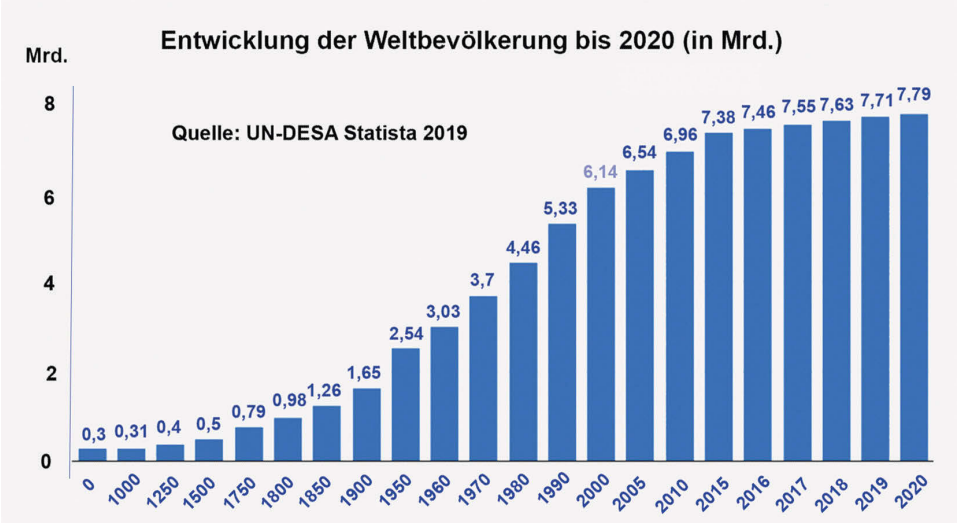


Abb. 5.6-1: *Wachstum der Weltbevölkerung seit Christi-Geburt bis 2018 (Quelle: UN DESA - Population Division, Statista 2018, ergänzt) (man beachte die ungleichen Zeitabstände der x-Achse).*

Im Jahre 2018 lebten 7,63 Mrd. Menschen auf der Erde. Dies ist nur eine Momentaufnahme, da die Weltbevölkerung zurzeit um 2,6 Menschen/Sekunde oder rund 230.000 Menschen/Tag zunimmt. Nach der Deutschen Stiftung Weltbevölkerung (DSW 2018) nimmt die Bevölkerung der Erde jährlich um etwa 83 Mio. zu – das ist in etwa die Bevölkerung Deutschlands. Wie *Abb. 5.6-1* zeigt, nahm die Weltbevölkerung bis zum Jahr 1500 nur langsam zu[1]. Im Jahr 1800 lebten etwa 1 Mrd. und erst 1927 2 Mrd. Menschen. Danach wurde die Zeit für die Zunahme der Weltbevölkerung um eine weitere Milliarde immer kürzer. In den letzten Jahrzehnten ist jedoch eine Verlangsamung der Zunahme zu beobachten. *Abb. 5.6-2* zeigt die Fertilitätsrate (Anzahl der Kinder pro Frau) in den Jahren 2010-2015. Während eine Frau in den 1950er Jahren im weltweiten Durchschnitt fünf Kinder bekam, waren es in den Jahren 2010-2015 nur noch 2,5 Kinder. Regional gibt es jedoch große Unterschiede.

Die technische Entwicklung, mehr Arbeitsplätze und das kulturelle Angebot haben eine starke Zuwanderung in die Städte (Landflucht) bewirkt. Beispielsweise hat sich die Anzahl der Hochschulen in Deutschland seit 1990 fast verdreifacht. In den 1950er Jahren lebten nur ca. 30% der Weltbevölkerung in Städten. Durch den Druck der Zuwanderung und das Bevölkerungswachstum nimmt die Bevölkerung in den Städten kontinuierlich zu. 2007 wurde bereits die 50%-Grenze überschritten. Da die Städte weltweit nur einen sehr kleinen Teil der Landfläche (3%) ausmachen, steigt in ihnen auch die Bevölkerungsdichte. In den Entwicklungs- und einigen Schwellenländern ist die Industrialisierung auf wenige Städte konzentriert. Diese führt oft zu einem ungeregelten Stadtwachstum und zur Bildung von Elendsvierteln (Slums).

Oft verlassen meist gutverdienende Familien die Städte, um sich in ländlichen Vororten anzusiedeln. Diese sog. Stadtflucht ist jedoch zahlenmäßig weit geringer als die Landflucht.

Der Begriff Stadt wird weltweit nicht einheitlich definiert. Ab welcher Größe ein Ort als Stadt bezeichnet wird und wo die Grenze einer Stadt liegt, wird unterschiedlich gehandhabt. Man nimmt oft Verwaltungsgrenzen; dadurch werden auch ländliche Gebiete in manchen Regionen als Teil einer Stadt erfasst.

[1] *Es ist hier erwähnenswert, dass verschiedene Pandemie-Wellen die Entwicklung der Weltbevölkerung vor 1500 signifikant beeinflusst haben. Dazu gehört die Justinianische Pest während des römischen Kaisers Justinian (527-565), die apokalyptische Ausmaße erreichte. Sie erfasste Nord- und Nordwesteuropa, den Mittelmeerraum, Nordafrika und den Iran. Man schätzt, dass beinahe ein Viertel der damaligen Weltbevölkerung der Pest zum Opfer gefallen ist. Ähnlich einschneidend waren die Pest-Epidemien während des Dreißigjährigen Krieges (1618-1648) in Europa. Man geht von etwa 40% der Gesamtbevölkerung aus, die ums Leben kamen, in manchen Regionen bis zu 70%, was zu einer Verödung großer landwirtschaftlicher Flächen führte. Im Gegensatz dazu hinterließ der 2. Weltkrieg (1939-1945) nur eine geringe Spur in der Kurve der Bevölkerungsentwicklung der Welt, allerdings ist auch heute noch eine deutliche Einkerbung in der Bevölkerungspyramide Deutschlands zu erkennen (Abb. 5.6-3). Es gab vermutlich 60-70 Mio. Tote bei einer Weltbevölkerung von rund 2.2 Mrd. Menschen (siehe u.a. Meier 2005).*

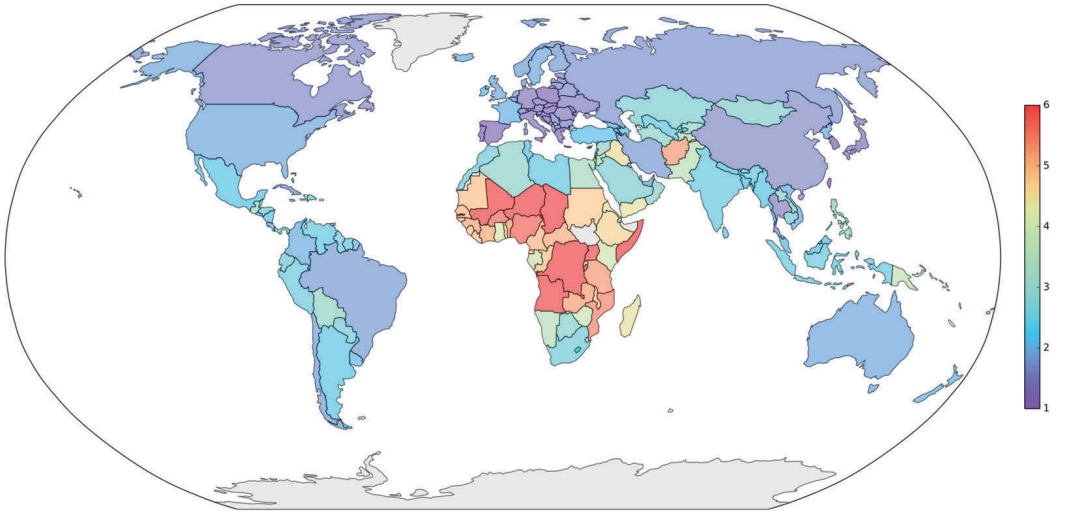


Abb. 5.6-2: *Fertilitätsrate nach Staaten (UN 2010-2015): Bei einem Wert von 2,1 bleibt die Bevölkerung konstant. Deutschland weist einen Wert um 1,3-1,4 auf, und seine Einwohnerzahl würde ohne Zuwanderung schrumpfen. Dagegen erkennt man vor allem in Afrika südlich der Sahara hohe Fertilitätsraten – rot gefärbt (Quelle: World Population Prospects - Population Division - United Nations).*

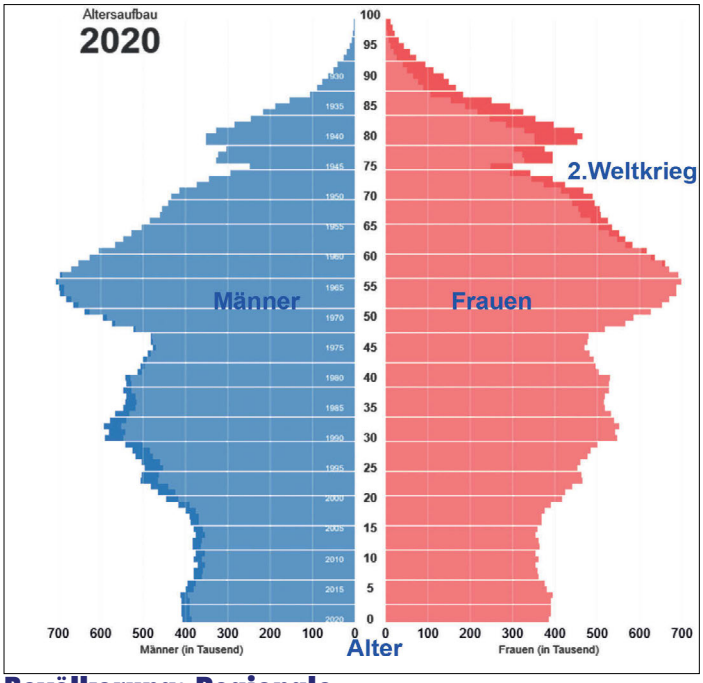


Abb. 5.6-3: *Bevölkerungspyramide für Deutschland (2020) [World Economic Forum].Blau: Männer pro Jahrgang; dunkelblau: Überschuß der Männer. Rot: Frauen pro Jahrgang; dunkelrot: Überschuß der Frauen. Abszisse: 100 000 je je senkrechte weiße Linie. Quelle: https://www.visualcapitalist.com/germany-scary-demographic-milestone/.*

Bevölkerung: Regionale Verteilung und Altersstruktur

Abb.5.6-4 zeigt die Weltbevölkerung bis Mitte 2018 verteilt nach Kontinenten. Rund 60 % (4.536 Mrd.) der Menschen leben in Asien (mit Türkei), 17% (1.284 Mrd.) in Afrika (mit Ägypten), 10% (746 Mio.) in Europa mit Russland, 9% (649 Mio.) in Lateinamerika und der Karibik, 5% (365 Mio.) in Nordamerika (USA & Kanada) und 0,5% (41 Mio.) in Ozeanien (inkl. Australien). China (1,40 Mrd. Fertilitätsrate 1,60) und Indien (1,38 Mrd., Fertilitätsrate 2,44) sind mit Abstand die Länder mit

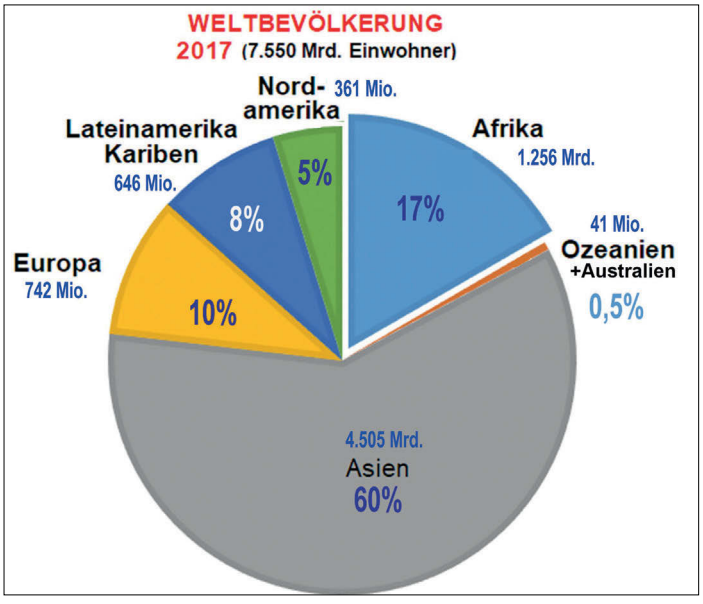


Abb. 5.6-4: *Verteilung der Weltbevölkerung nach Kontinenten - 2017 (Quelle UN DESA - Population Division, Statista 2018).*

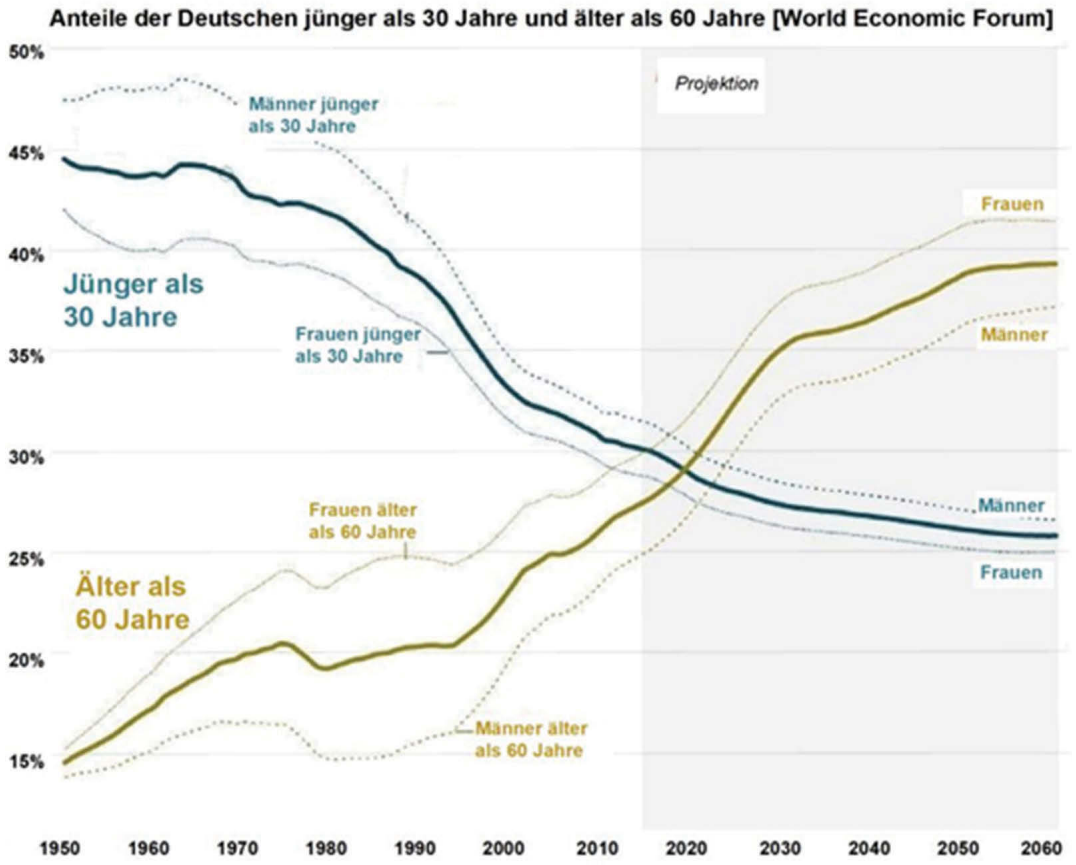


Abb. 5.6-5: *Anteile der Deutschen jünger als 30 Jahre und älter als 60 Jahre seit 1950 und Projektion bis 2060.*

der größten Bevölkerung. Indien wird also bald das bevölkerungsreichste Land sein

Weltweit gibt es knapp mehr Männer als Frauen; je 102 Männern stehen 100 Frauen gegenüber. Dieser Anteil ist aber abhängig von der Altersgruppe (es gibt mehr junge Männer und mehr ältere Frauen). Die Hälfte der Menschen ist jünger als 30 Jahre, 26% sind jünger als 15 Jahre; 61% zwischen 15 und 59 Jahren und 13% über 60. Von diesen drei Gruppen wird der Anteil der 3. Gruppe aufgrund der schrumpfenden Geburtenraten und der höheren Lebenserwartung und sinkenden Sterberaten – wie schon in den Industrieländern - zunehmen. Dies wird besonders deutlich aus der *Abb. 5.6-5*. Die Zahl der über 60-Jährigen übertrifft ab etwa 2020 die der unter Dreißigjährigen immer mehr; Deutschland überaltert!

Aufgrund der geringen Fertilitätsrate (1,57 im 2017) ist bereits jetzt ein deutlich höheres mittleres Alter der deutschen Bevölkerung zu erkennen. Dadurch ist der Anteil jüngerer Menschen bis 15 Jahre gering. Mit 13,1% ist er nur halb so groß wie im globalen Mittel. Demensprechend ist der Anteil der über 65jährigen relativ groß (21,5%).

Wachstumsrate der Weltbevölkerung

Abb. 5.6-6 zeigt die aktuelle Wachstumsrate der Bevölkerung je nach Kontinent. Mit Ausnahme von Afrika ist das Wachstum der Bevölkerung auf allen Kontinenten verglichen mit dem in den 1950er Jahren wesentlich geringer geworden. In Europa schrumpft sogar schon jetzt die Bevölkerung um 0,1%. Weltweit wächst die Bevölkerung aber noch immer um 1,2% (nach der Weltbank um 1,1%) pro Jahr; dies entspricht einer Fertilitätsrate von 2,5 Kindern je Frau. Nach Schätzung der Vereinten Nationen könnte die Geburtenrate bis zum Ende des Jahrhunderts auf zwei Kinder pro Frau sinken. Mit dieser Fertilitätsrate würde die Weltbevölkerung fast konstant bleiben (»Erhaltungsrate«). In einigen afrikanischen Ländern jedoch bringen die Frauen auch noch heute vier oder mehr Kinder zur Welt. Nach UN (2018) gibt es al-

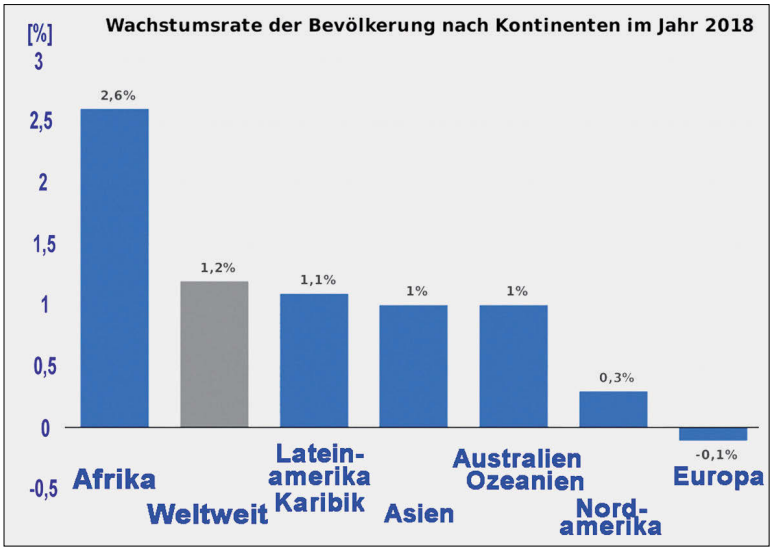


Abb. 5.6-6: *Aktuelle natürliche Wachstumsrate der Bevölkerung nach Kontinenten in % pro Jahr. 1,2% entspricht 2,5 Kinder je Frau (Quelle: DSW & Statista 2018; übersetzt). Natürliche Wachstumsrate = Zahlen ohne Migration.*

lerdings in Afrika bereits Anzeichen einer Abnahme der Wachstumsrate, auch weil die meisten Länder in Afrika an der Reduzierung der Geburtenrate interessiert sind.

Nach der aktuellen UN-Prognose (DWS 2019) wird die Weltbevölkerung zunächst noch weiter anwachsen. Im Jahr 2050 werden schätzungsweise 9,7 Mrd. und 2100 10,9 Mrd. Menschen auf der Welt leben. Die Schätzungen (10,0 Mrd bzw. 11.2 Mrd.) aus dem Jahr 2017 wurden aufgrund Abnahme der Geburtenraten in einigen Ländern leicht nach unten korrigiert (*Abb. 5.6-7*). Danach werden 2100 4,5 Mrd. in Afrika und 4,8 Mrd. in Asien leben, weil die Geburtenrate in Afrika hoch bleiben und die Bevölkerung Chinas von 1,40 auf 1,02 Mrd. sinken werden. Die Länder mit den höchsten Geburtenraten in Afrika sind: Nigeria, Äthiopien, Ägypten, Tansania und Kongo; in Asien sind es neben Indien, Pakistan und Indonesien. Die Bevölkerung in Europa wird von 742 Mio. (2017) auf 653 Mio. im Jahr 2100 schrumpfen. In den folgenden Ländern ist die Sterberate größer als die Geburtenrate: Deutschland, Estland, Ungarn, Italien, Russland, Serbien, Weißrussland und Ukraine. In Asien gehören zu dieser Gruppe: China und Japan (DSW 2019).

Die Länder mit einer aktuellen Fertilitätsrate von 1,5 Kindern pro Frau oder weniger wollen diese meist durch politische Maßnahmen anheben. In Deutschland (zurzeit mit Fertilitätsrate 1,5) wird beispielsweise durch Zahlung von Kindergeld und Kinderzuschlag eine Erhöhung der Kinderzahl unterstützt. Hingegen unternehmen Länder mit Werten zwischen 1,5-2,5 in der Regel wenig zur Beeinflussung der Fertilitätsrate.

Um dem starken Bevölkerungswachstum entgegen

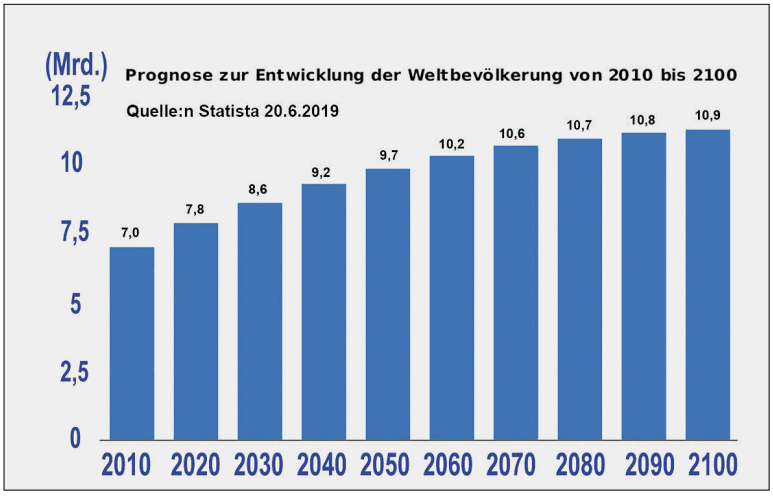


Abb. 5.6-7: *Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung bis 2100 unter der Annahme einer günstigen demographischen Entwicklung (aus UN 2017).*

zu wirken, wurde in China 1979-1980 die Ein-Kind-Politik eingeführt. Diese führte jedoch zu oft negativen sozialen Folgen. Beispielsweise führte diese Politik u.a. zur Überalterung der Gesellschaft mit entsprechenden Konsequenzen für das Renten- und Gesundheitssystem und zur Entstehung einer Generation von verwöhnten Einzelkindern mit unsozialem Verhaltensmuster. Da Jungen bevorzugt wurden, gab es nach einigen Jahren für 120 Männer nur 100 Frauen. 2016 wurde die Ein-Kind-Politik offiziell aufgehoben und seitdem gilt die Zwei-Kinder-Politik als Leitlinie. Zurzeit beträgt die Fertilitätsrate 1,6 und 2,1 ist das Ziel.

Landflucht, Megastädte und Bevölkerungsdichte

Weltweit lebten schon 2007 knapp über 50 Prozent der Menschen in Städten. 2018 waren es 55 Prozent. Im Jahr 1950 lag der Anteil der Stadtbevölkerung noch bei nur 30%. Der Trend wird sich sehr wahrscheinlich noch fortsetzen. Nach Schätzung der Vereinten Nationen werden im Jahr 2050 vermutlich 70 Prozent der Menschen in Städten leben. In absoluten Zahlen bedeutet dies eine Verdopplung der Stadtbevölkerung auf 6 Mrd. Menschen im Jahre 2050. In der Europäischen Union betrug nach UN Habitat (2011) die städtische Bevölkerung über 75%, und dieser Anteil wird bis 2050 voraussichtlich auf 82% ansteigen. In Deutschland lebten 1960 71,38% und 2017 schon 77,26% in der Stadt. In China ist die Landflucht weniger ausgeprägt als im globalen Durchschnitt. 2007 lebten nur 45,9% und 2017 58,5% in der Stadt. In Afrika ist der Anteil der Landbevölkerung je nach Land sehr unterschiedlich. In sehr armen Ländern wie Burundi und Burkina Faso ist der Anteil der Landbevölkerung 87% bzw. 81% der Gesamtbevölkerung noch sehr hoch. In Ägypten leben in ruralen Regionen rund 57% der Bevölkerung.

1870 gab es nur 3 Millionenstädte (London, Paris und New York City). 1910 nahm diese Zahl auf 12 zu. Chicago, Tokio, Wien, Berlin, Sankt Petersburg, Moskau, Philadelphia, Buenos Aires und Bombay waren dazugekommen. 1950 gab es bereits 20 Millionenstädte. Diese Zahl nahm im Jahr 2000 auf 371 und 2018 bereits auf 548 zu und könnte bis 2030 auf 706 anwachsen (Vereinte Nationen). 2018 überstieg in 33 Städten

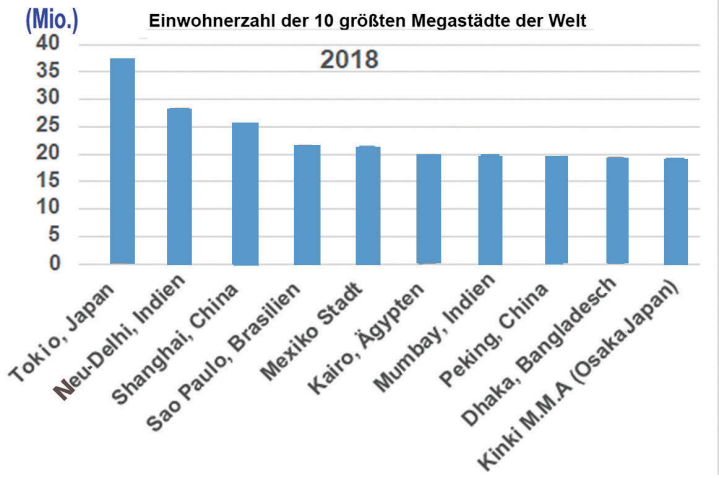


Abb. 5.6-8a: *Einwohnerzahl der 10 größten Megastädte der Welt im Jahr 2018 (Daten UN 2018).*

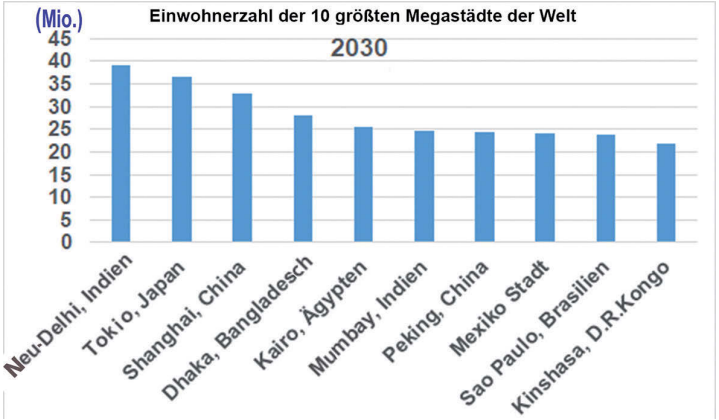


Abb. 5.6-8b: *Die 10 größten Megastädte der Welt nach der Prognose für das Jahr 2030 (Daten UN 2018).*

die Bevölkerungszahl die Zehn-Millionen-Grenze (Megastadt), und es wird nach den Vereinten Nationen bis 2030 43 solche geben.

In *Abb. 5.6-8*a sind die 10 größten Megastädte der Erde des Jahres 2018 zusammengefasst. Zum Vergleich zeigt *Abb. 5.6-8b*, welche Änderungen aufgrund der Prognose bis zum Jahr 2030 eintreten werden (UN 2018). Tokio ist mit seinen Vorstädten zurzeit die größte Stadt der Welt, wie *Abb. 5.6-9* symbolhaft zeigt. Dort leben mehr als 37,5 Millionen Menschen auf extrem engem Raum (Stand 2018). Nach der UN-Schätzung wird diese Bevölkerung bis zum Jahr 2030 auf ca. 36,6 Millionen Menschen schrumpfen. Für Neu-Delhi (Indien) wird dagegen ein starker Zuwachs der Bevölkerung von 28,5 auf 38,9 Millionen Menschen vorausgesagt. Damit wird Neu-Delhi voraussichtlich im Jahr 2030 die größte Stadt der Welt geworden sein.

In Shanghai (China) sollten statt 25,6 dann 32,9 Millionen Menschen im Jahr 2030 leben. Damit bleibt es die drittgrößte Stadt. Auch die Hauptstadt von Bangladesch, Dhaka zeigt – wie Neu-Delhi – eine hohe Wachstumsrate. Man sagt für diese Stadt eine Zunahme der Bevölkerung von 19,6 auf 28,1 Millionen Menschen bis 2030 voraus. Damit wird Dhaka im Jahr 2030 nach Neu-Delhi, Tokio und Shanghai den 4. Platz einnehmen. Sao Paulo (Brasilien) (21,6 Millionen), Mexiko Stadt (21,6 Millionen), Kairo (Ägypten) 20,1 Mio. sowie Bombay (Indien) 20,0 Mio. und Peking (China) 19,6 Mio. werden mit einem geringeren Bevölkerungszuwachs unter den größten Megastädten bleiben. Neu in der Liste ist Kinshasa (D. R. Kongo); seine Einwohneranzahl wird bis 2030 auf 21,9 Mio. wachsen. Die Megastadt Kinki M.M.A. (früher Osaka, Japan) liegt zurzeit mit 19,3 auf Rang 10. 2030 wird sie knapp außerhalb liegen.

China ist heute das bevölkerungsreichste Land der Erde; seine mittlere Bevölkerungsdichte beträgt aufgrund seiner großen Fläche nur 151 Menschen/km² (Vereinte Nationen 2018). Sie ist damit niedriger als in Deutschland, wo im Mittel 236 Menschen/km² leben. In Indien zählt man dagegen schon 450. Die höchste Bevölkerungsdichte wird in Monaco und Macao mit Werten um 20.000 Menschen/km² registriert. In Singapur beträgt die Bevölkerungsdichte ca. 7.800 Menschen/km² und in Hong Kong 6.690. In Tokio leben auf jedem Quadratkilometer mehr als 6.000 Menschen.



Abb. 5.6-9: *Blick auf Hochhausfassaden in Tokyo. Aus Platzmangel geht es immer mehr in die 3. Dimension – nach oben und nach unten (Foto S.-W. Breckle).*

Oft sind die Millionenstädte nicht gleichzeitig Metropolen oder Weltstädte. Das ist oft der Fall bei großen Städten in Asien oder Afrika, die kaum eine internationale Bedeutung erreicht haben. Die demographische Entwicklung ist auch sehr heterogen. Australien - mit einer Einwohnerzahl von 25 Mio. hat 5 Millionenstädte (Sydney, Melbourne, Brisbane, Perth und Adelaide). In Deutschland mit einer Einwohnerzahl von 82,8 Mio. gibt es nur 4 Millionenstädte: Berlin, Hamburg, München und Köln.

Auch in Zukunft wird sich die Verschiebung der Bevölkerung hin in die Großstädte fortsetzen. Wenn allerdings in küstennahen Städten der Meeresspiegelanstieg immer mehr zum Problem wird, ist eine zusätzliche Wanderungsbewegung absehbar in die höher gelegenen Städte. Es wird nicht möglich sein durch ausreichende Baumaßnahmen die ganze Infrastruktur der großen Hafenstädte zu erhalten.

Von Interesse ist die Zuwanderung in die Städte auch aus Sicht eines Statistikers zu dokumentieren. Die Binnenmigration (Landflucht) in Deutschland zeigt nach Bauer et al. (2019), dass von 2008 bis 2014 250.000 Deutsche mehr in die Städte zogen als von dort fortzogen. Betrachtet man die Altersgruppen 18- bis 29-Jährige in gleichem Zeitraum, dann ist die Differenz noch höher; die Wanderung in die Städte war fast 460.000 höher, als die, die von dort fortzogen. Die Stadtflucht, die weit geringer als die Landflucht ist, wird jedoch durch ältere Personen dominiert.

Die Verkehrsprobleme, die Versorgungsengpässe der Bevölkerung in Ballungszentren, das überhitzte Stadtklima und notwendige Klimatisierungsaufwendungen im Verein mit irrationalen politischen Entscheidungen werden dazu führen, dass weiterhin Wanderungsbewegungen vielleicht in noch größerem Ausmaß als bislang ablaufen werden. Aber angesichts der in vielen Regionen schwebenden kriegerischen Auseinandersetzungen sind Vorhersagen nicht möglich.

Literatur

BAUER T. K., C. RULFF & M. TAMMINGA (2019): Berlin Caling - Internal Migration in Germany. Ruhr Economic Papers #823. 27 S. ISBN 978-3-86788-956-8 DOI: 10.4419/86788956.

DWS (2019) (Deutsche Stiftung Weltbevölkerung): Weltbevölkerung wächst bis 2050 auf 9,7 Milliarden Menschen. DSW: Ohne zusätzliche Familienplanungsangebote wird die Fertilitätsrate in Afrika nicht sinken. *https://www.presseportal.de/pm/24571/4298784 - www.dsw.org./menschen-zieht-es-in-die-stadt/.*

DWS (2018) (Deutsche Stiftung Weltbevölkerung): Zu Beginn des neuen Jahres leben 7.674.575.000 Menschen auf der Erde. *https://www.presseportal.de/pm/24571/4149734.*

MEIER M. (2005): »Hinzu kam auch noch die Pest …« Die sogenannte Justinianische Pest und ihre Folgen. In: Mischa Meier (Hrsg.): Pest. Die Geschichte eines Menschheitstraumas. Klett-Cotta, Stuttgart 2005, ISBN 3-608-94359-5. 86 S.

UN (2018) (United Nations): Department of Economic and Social Affairs, Population Division - United Nations, Department Population Facts No. 2017/3, October 2017: The end of high fertility is near. S. 2. *https://population.un.org/wup/ - http://www.un.org/en/development/desa/population/theme/urbanization/index.sht*ml

UN (2017) (United Nations): Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects: The 2017 Revision, Volume II: Demographic Profiles. ST/ESA/SER.A/400. 883 S. *https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_Volume-II-Demographic-Profiles.pdf*

UN-Habitat (2011): UN-Habitat annual Report 2010. 72 S. *https://unhabitat.org/year/2011/.*

Kontakt:
Dr. José L. Lozán
Universität Hamburg
Lozan@uni-hamburg.de
Prof. Siegmar-W. Breckle
Ökologie Bielefeld - breckle@gmx.de
Prof. Dr. Hartmut Graßl
Max-Planck-Institut für Meteorologie
hartmut.grassl@mpimet.mpg.de

Lozán, J. L., S.-W. Breckle & H. Grassl (2019): Entwicklung der Weltbevölkerung, Megastädte und Landflucht. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 188-195. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.28.

6. WAS MUSS GETAN WERDEN: Gestaltung und Anpassung sowie Klimaschutz in Städten

In diesem Kapitel werden Maßnahmen zur Minderung negativer Stadtklimaeffekte auf die Gesundheit der Menschen und die Natur vorgestellt. Vielfach wird die Verbesserung grüner Infrastruktur empfohlen, auch wenn ihre Wirkung auf die Temperatur meist auf die unmittelbare Umgebung des Standortes selbst beschränkt ist. Eingegangen wird ebenfalls auf Wege zu einem umweltgerechten Verkehr, einer Verminderung der Luftverschmutzung und Verringerung des Lärms in Städten. Eine Klimaneutralität im Gebäudebestand soll entsprechend dem Paris-Abkommen bis 2050 erreicht werden, eine wahrlich große Herausforderung. Das deutsche Baugesetzbuch besagt, dass bei allen Planungen neben dem Klimaschutz auch die Klimaanpassung zu berücksichtigen ist. Mit diesem und anderen Instrumenten sind wichtige politische Rahmenbedingungen gegeben. Um geeignete Maßnahmen der Stadtplanung in die Praxis umzusetzen, muss aber auch in der zuständigen Verwaltung ein ausreichendes Problembewusstsein und das nötige Wissen vorhanden sein.

6.1 Planungsrechtliche Instrumente zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen

Nicole Baumüller

Der Klimawandel schreitet voran und die Folgen werden immer stärker sichtbar. Insbesondere in Städten besteht Handlungsbedarf, um mit den zunehmenden Wetterextremen wie Hitze, Trockenheit, Starkregen und Hochwasser umzugehen. Bei der Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen auf lokaler Ebene nehmen die Kommunen eine Schlüsselrolle ein. Im Rahmen ihrer Planungshoheit können sie Einfluss auf die räumliche Entwicklung und städtebauliche Ordnung in den Städten nehmen. Der Beitrag beschäftigt sich mit der Klimaanpassung in der Stadtplanung, den planungs- und fachrechtlichen Rahmenbedingungen und beleuchtet die Bedeutung der Planungsinstrumente bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen.

***Climate adaptation as a task of urban planning:** Climate change is progressing and the consequences are becoming increasingly visible. Especially in cities, there is a need for action to deal with the increasing extreme weather like heat, drought, heavy rain and flooding. Local authorities play a key role in implementing climate adaptation measures at local level. Within the framework of their planning authority, they can influence the spatial development and urban planning order in the cities. The article deals with climate adaptation in urban planning, the planning and technical framework conditions and sheds light on the importance of planning instruments in the implementation of adaptation measures.*

Anpassungserfordernis in Städten

Neben dem Klimaschutz kommt der Anpassung an den Klimawandels eine immer größere Bedeutung zu (UBA 2014). Der Handlungsbedarf ist in Städten besonders groß, da dort viele Menschen leben und die Infrastruktur besonders anfällig ist. Hitzebelastungen tragen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen und verminderter Arbeitsleistung bei, wohingegen Starkregenfälle und Hochwasserereignisse hohe materielle Schäden verursachen. Lang anhaltende Trockenheit dagegen führt zu Hitzestress beim städtischen Grün. Demzufolge sind vorsorgende Maßnahmen zu ergreifen, um im städtischen Raum die Lebensqualität zu erhalten und die Schäden an Infrastruktur, Gebäuden und Grün zu minimieren (BMUB 2016). Die Kommunen haben auf lokaler Ebene eine Schlüsselrolle, um Maßnahmen umzusetzen (DST 2019). Der Deutsche Städtetag sieht deshalb eine Aufgabe darin, ganzheitliche umfassende Klimaanpassungskonzepte zu entwickeln, die fachbereichs- oder dezernatsübergreifend erstellt werden (DST 2019). Zudem weist er darauf hin, dass die dafür notwendigen interdisziplinären Arbeitsstrukturen und personellen Ressourcen geschaffen werden sollten. Eine Vorreiterrolle bei kommunalen Klimaanpassungskonzepten nehmen derzeit die Großstädte ein. Demgegenüber ist das Thema in vielen kleinen Kommunen und in den Landkreisen/Kreisen noch voranzubringen (UBA 2019). Neben der Entwicklung von Anpassungskonzepten ist es von hoher Bedeutung, die Klimaanpassung als Querschnittsaufgabe in die kommunalen

Verwaltungen dauerhaft zu verstetigen. Die Stadt Regensburg hat dafür eine Klimaresilienzmanagerin in ihrer Verwaltung etabliert, um die einzelnen Fachstellen zu koordinieren (Stadt Regensburg 2019). Die Stadt Stuttgart konnte auf vorhandenen Strukturen zurückgreifen und das Thema Klimaanpassung bei der Abteilung Stadtklimatologie im Amt für Umweltschutz ansiedeln (Stadt Stuttgart 2019).

Bedeutung der kommunalen Stadtplanung

Im Jahr 2008 wurde die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel verabschiedet und die Klimaanpassung als neues politisches Handlungsfeld eingeführt (Bundesregierung 2008). Die Deutsche Anpassungsstrategie spricht der Raum-, Regional- und Bauleitplanung aufgrund ihres Instrumentariums eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zu. So sollen Planungsverfahren genutzt werden, um Anpassungsziele und -maßnahmen aus verschiedenen Sektoren zu integrieren. Demzufolge wurden in den Jahren 2009 bis 2014 Forschungsprogramme von verschiedenen Bundesministerien gefördert, die aufzeigen sollten, wie den Folgen des Klimawandels in der Stadtplanung begegnet werden kann (BBSR 2014). Das Projekt StadtKlima ExWoSt brachte erste Erkenntnisse für die kommunale Stadtplanung. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sind Leitfäden erstellt worden, die Hinweise zur Hitze- und Überflutungsvorsorge für den Stadtumbau und die Stadtentwicklung zusammenfassen (BBSR 2015, BBSR 2016). Das Umweltbundesamt hat die Praxishilfe Klimaanpassung in der räumlichen Planung als Unterstützung für die Städte und Kommunen herausgegeben (UBA 2014).

Die Aufgaben der Klimaanpassung umfassen zwar keine neuen Themen, ihre Bedeutung für die Stadtentwicklung muss jedoch aufgrund der Kenntnisse zur globalen Klimaveränderung und ihrer regionalen Auswirkungen neu bewertet werden. Der Hochwasserschutz, das Stadtklima und das Regenwassermanagement gehören bereits zu Standardaufgaben in vielen Städten, an welche angeknüpft werden kann. Oft findet Klimaanpassung statt, auch wenn sie nicht als Klimaanpassung bezeichnet wird, insbesondere beim Hochwasserschutz, der Grünentwicklung und der Vermeidung von Versiegelung (BMUB 2016). Aus den Klimaanpassungskonzepten geht jedoch hervor, dass die Klimafolgen im städtischen Raum stärker beachtet werden und die relevanten Belange bei Planungsverfahren sowie in Sanierungs- und Stadtumbaugebieten ein höheres Gewicht bekommen sollten. Ein wichtiger Belang stellt die Hitzevorsorge dar (BBSR 2015). Für die Anpassung an die zunehmende Hitze in Städten sind stadt- und mikroklimatisch wirkende Maßnahmen frühzeitig in Planungen zu integrieren. Dafür spielen folgende Handlungsfelder eine besondere Rolle (Baumüller 2018):

- Grüne Infrastruktur: Grün- und Parkanlagen, Bäume im Stadtraum, Stadtwälder
- Bauwerksbegrünung: Dachbegrünung, Fassadenbegrünung, Baubotanik
- Blaue Infrastruktur: Wasserflächen in Parkanlagen, Wasser auf Plätzen
- Oberflächen- und Straßenraumgestaltung: Straßenraumgestaltung, Oberflächenentsiegelung, Albedomanagement
- Durchlüftung: Regionale Windsysteme, thermische Konvektion, lokale Kaltluftsysteme

Klimaanpassung im Baugesetzbuch

Im Rahmen ihrer Planungshoheit haben die Kommunen die Aufgabe, eine nachhaltige geordnete städtebauliche Entwicklung und Ordnung in den Städten umzusetzen (vgl. § 1 (3) BauGB). Den gesetzlichen Rahmen dafür spannt das Baugesetzbuch (BauGB) auf. Mit der Novellierung des Baugesetzbuches in den Jahren 2011 und 2013 haben die Kommunen auch formal die Verantwortung für die Förderung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen im Rahmen ihrer kommunalen Planungshoheit zugesprochen bekommen (UBA 2018). Der Gesetzgeber hat an mehreren Stellen im Baugesetzbuch die Klimaanpassung als Aufgabe und Abwägungsbelang eingeführt. Dabei ist die Klimaanpassung ein Belang von vielen, welche die Städte und Kommunen bei der Stadtentwicklung berücksichtigen sollen (§ 1 (5) und (6) BauGB).

Die Kommunen verfügen über verschiedene Planungsinstrumente, die sie zur Steuerung der Stadtentwicklung einsetzen können. Das zentrale Instrument ist die Bauleitplanung. Der § 1 (5) 2 BauGB wurde im Jahr 2011 dahingehend angepasst, dass die Bauleitpläne dazu beitragen sollen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern, sowie die städtebauliche Gestalt und das Orts- und Landschaftsbild baukulturell zu erhalten und zu entwickeln. In den ergänzenden Umweltvorschriften des § 1a BauGB sind die Anforderungen für den sparsamen Umgang mit Grund und Boden (Innenentwicklung) sowie für die Berücksichtigung einer klimagerechten Stadtentwicklung explizit benannt. Die Klimaschutzklausel in § 1a (5) BauGB fordert konkret, dass den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl

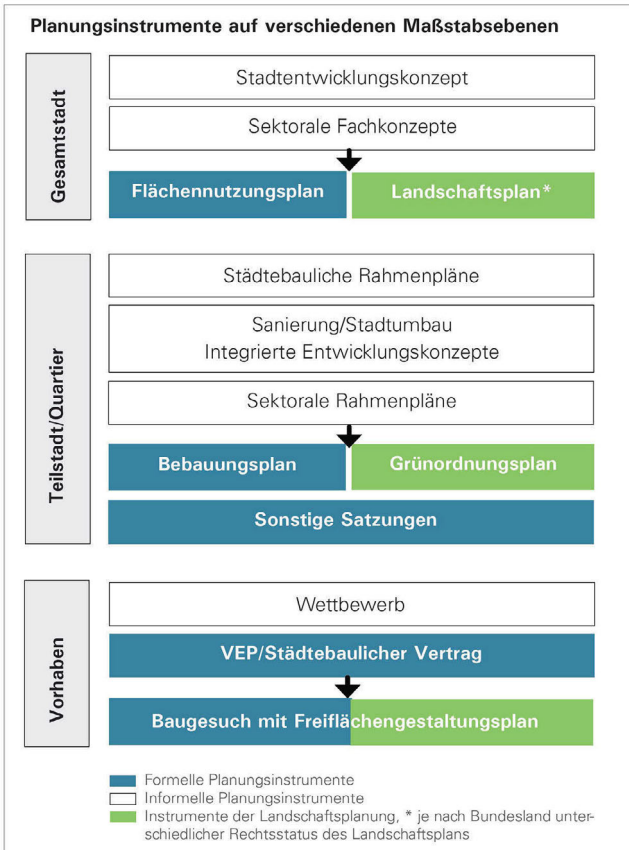


Abb. 6.1-1: *Planungsinstrumente auf verschiedenen Maßstabsebenen. Quelle: Baumüller 2018.*

durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, Rechnung getragen werden soll und dieser Grundsatz in der Abwägung nach § 1 (7) BauGB zu berücksichtigen ist. Das bedingt auch, dass die Klimaanpassung nach § 2 (4) BauGB bei Planungsverfahren wie Bebauungsplänen und Flächennutzungsplänen Bestandteil der Umweltprüfung ist.

Formelle Planungsinstrumente

Der Deutsche Städtetag betont, dass den Städten im Zusammenspiel zwischen formellen und informellen Planungsinstrumenten eine breite Palette von Steuerungsmöglichkeiten bereitsteht, strategische Ziele der Klimaanpassung zu verankern und konkrete Anpassungsmaßnahmen umzusetzen (DST 2012). Dabei sind alle Planungsebenen von der Gesamtstadt über das Stadtquartier bis zum einzelnen Vorhaben einzubeziehen (vgl. *Abb. 6.1-1*).

Ein wesentliches formelles Steuerungsinstrument ist die Bauleitplanung. Auf Ebene der Flächennutzungsplanung ist durch Änderungen im § 5 (2) Nr. 2a BauGB die Voraussetzungen dafür geschaffen worden, dass Anlagen, Einrichtungen und sonstige Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, dargestellt werden können. So



Abb. 6.1-2: *Flächennutzungsplan 20130 Esslingen (Vorentwurf), Quelle: Stadt Esslingen 2016.*

können im Flächennutzungsplan im Interesse der Klimaanpassung Nutzungsbeschränkungen oder Vorkehrungen vorgesehen werden (Spannowsky 2016). Als Beispiel seien hier Flächen für Hochwasserschutz und Luftleitbahnen genannt. Beispielhaft ist die Stadt Esslingen zu nennen, die ihren Flächennutzungsplan 2030 um die Darstellung klimarelevanter Belange in Form nachrichtlicher Hinweise ergänzen will (*Abb. 6.1-2*).

Für Bebauungspläne sieht der Festsetzungskatalog des § 9 BauGB keine expliziten Regelungen für Maßnahmen der Klimaanpassung vor. Jedoch können eine Vielzahl von Festsetzungen im Interesse der Klimaanpassung angewandt werden (Spannowsky 2016). Insbesondere die Festsetzungsmöglichkeiten zum Maß der Nutzung, zu Grün- und Waldflächen, überbaubarer Fläche, Bauhöhen, Pflanzverpflichtungen und Begrünungsmaßnahmen sowie zur Gestaltung befestigter Oberflächen (UBA 2014). Nicht weniger von Bedeutung sind für den Umgang mit Niederschlägen die örtlichen Bauvorschriften, welche auf Basis der Landesbauordnungen erlassen werden können. Städtebauliche Verträge nach § 11 und 12 BauGB, die in der Regel bei Bebauungsplänen mit Investoren abgeschlossen werden, bieten die Chance darüber hinaus, ergänzende Vereinbarungen zu treffen.

Das Beispiel eines Bebauungsplans der Stadt Stuttgart zeigt, wie klimatische Belange in den Planungsprozess und abschließend im Bebauungsplan verankert werden können. Die Stadt Stuttgart hatte mit Verlegung des Olgahospitals im Stuttgarter Westen die Chance, das Areal neu zu ordnen und einer Mischnutzung zuzuführen. Als Planungsgrundlage wurde im Jahr 2011 ein städtebaulicher Wettbewerb ausgelobt (LHS 2011). Auf die klimatische Situation mit hoher bioklimatischer Belastung und schlechter Durchlüftung wurde bereits im Auslobungstext hingewiesen sowie Planungsempfehlungen geben, um die klimatische Situation zu verbessern. Nach Abschluss des Wettbewerbs wurde ein Bebauungsplan der Innenentwicklung nach § 13a BauGB aufgestellt, der im Jahr 2016 zur Satzung beschlossen wurde (LHS 2016). Der Bebauungsplan hat klimatisch wirksame Maßnahmen auf der Grundlage des städtebaulichen Entwurfs rechtlich verankert (*Abb. 6.1-3*). Die Festsetzung der öffentlichen Grünflächen sichert einen Grünausgleich innerhalb des dicht bebauten Quartiers und seiner Umgebung. Die überbaubaren Flächen wurden über Baufenster klar definiert, ebenso die Höhenentwicklung. Zudem wurden Festsetzungen zu Pflanzverpflichtungen und Baumstandorten getroffen. Ferner ist geregelt, dass die Flachdächer zu begrünen sind, soweit nicht flächige integrierte Photovoltaikelemente vorgesehen sind, und dass die nicht überbauten Oberflächen von Tiefgaragen und Unterbauungen mit einer Substratschicht von mindestens 100 cm zu versehen, intensiv zu begrünen und so dauerhaft zu erhalten sind. Der für die Durchlüftung bedeutende Straßenzug der Bebel-/Bismarck-/Schloßstraße wurde aufgeweitet und begrünt, so dass hier eine Verbesserung der Durchlüftung zu erwarten ist.

Bedeutung Abwägungsprozess

Die Städte und Kommunen haben im Rahmen der Bauleitplanung öffentliche und private Belange gerecht untereinander abzuwägen (vgl. § 1 (7) BauGB). Sofern Maßnahmen der Klimaanpassung keine verbindlichen fachrechtlichen Anforderungen haben, können diese zugunsten anderen Zielen abgewogen werden. Bis heute gibt es für das Schutzgut Klima im Sinne des Stadtklimas keine gesonderten fachrechtlichen Anforderungen oder Normen, welche Vorgaben für die Planung formulieren. Für wasserrechtliche Belange bietet das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) eine rechtliche Grundlage. So nimmt zum Beispiel der Hochwasserschutz als Abwägungsbelang unmittelbar Einfluss auf die städtebauliche Planung (Spannowsky 2016). Die fehlenden rechtlichen Vorgaben in Bezug auf das Stadtklima eröffnen den Verwaltungen und Entscheidungsträgern erhebliche Spielräume bei der Abwägung und Wahl verbindlicher Regelungen. Dies wird als ein bedeutendes Hemmnis bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Hitzevorsorge gesehen. Deshalb wird der Bewusstseinsbildung für das Thema in der Politik, bei Entscheidungsträgern und in der Öffentlichkeit eine große Bedeutung beigemessen, damit der Stellenwert stadtklimatischer Maßnahmen für die Hitzevorsorge steigt (DST 2019).

Informelle Planungsinstrumente

Da es sich bei der Klimaanpassung um eine langfristige Aufgabe handelt, spielen informelle Instrumente wie Entwicklungskonzepte und Rahmenpläne eine wichtige Rolle. Sie eignen sich gut, mittel und langfristige Zielsetzungen darzustellen und mit anderen Belangen abzustimmen. Zudem können sie größere räumliche Bereiche umfassen. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist, dass diese Konzepte oft von einem Beteiligungsprozess flankiert werden. Damit leisten sie einen wertvollen Beitrag zum Wissenstransfer in Politik, Öffentlichkeit und Verwaltung. In den letzten Jahren sind in einigen Städten erste Rahmenpläne und planerische Klimaanpassungskonzepte entwickelt und vom Gemeinderat beschlossen worden. Sie fallen



Abb. 6.1-3: *Bebauungsplan Schloß- (ehemals Bismarck-)/ Hasenberg- / Breitscheid-/Senefelderstraße, Stuttgart-West (Stgt 258), Auszug Planteil, Quelle: LHS 2016.*

nach § 1 (6) 11 BauGB unter die Rubrik städtebauliche Entwicklungskonzepte oder sonstige städtebauliche Planungen und sind damit im Rahmen der Abwägung zu beachten. Klimaanpassungskonzepte flankierend zu den Stadtentwicklungskonzepten wurden zum Beispiel von der Stadt Ludwigsburg (2015) und der Stadt Freiburg (2019) erstellt. Der Stadtentwicklungsplan Klima konkret der Senatsverwaltung Berlin gibt Hinweise für Handlungsmöglichkeiten auf städtebaulicher Ebene und ergänzt damit die übergeordneten Anpassungskonzepte (SenStadt Berlin 2016).

Ein weiteres Beispiel ist der im Jahr 2015 beschlossene Rahmenplan Klimaanpassung der Stadt Karlsruhe (2015a). Eine zentrale Rolle bei der Klimaanpassung in Karlsruhe spielt die prognostizierte Zunahme der sommerlichen Hitzebelastung, welche sich negativ auf das Stadtklima und den Klimakomfort auswirken kann. Für die Stadtplanung in Karlsruhe wird Handlungsbedarf gesehen, mit dem zukünftigen Ziel stadtklimatische Aspekte systematisch in Planungsprozessen ganzheitlich zu berücksichtigen und nicht nur einzelfallbezogen

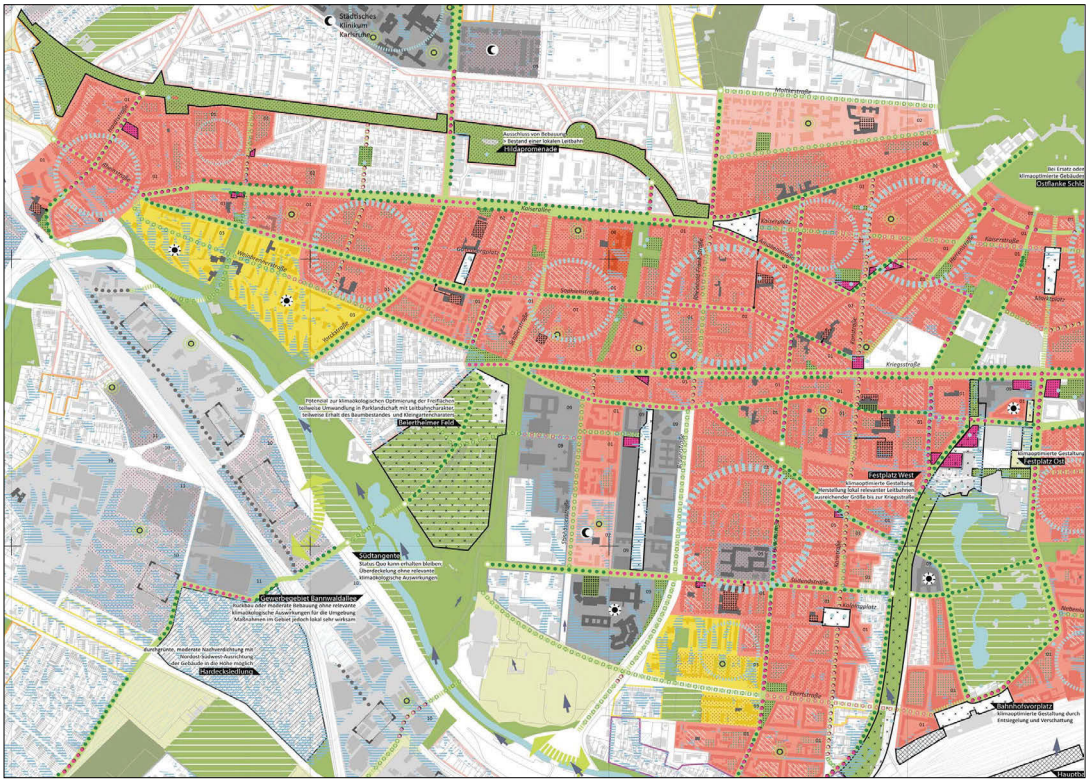


Abb. 6.1-4: *Rahmenplanklimaanpassung, Auszug Planteil, Quelle: Stadt Karlsruhe 2015, Grafik: berchtoldkrass space&options, Karlsruhe.*

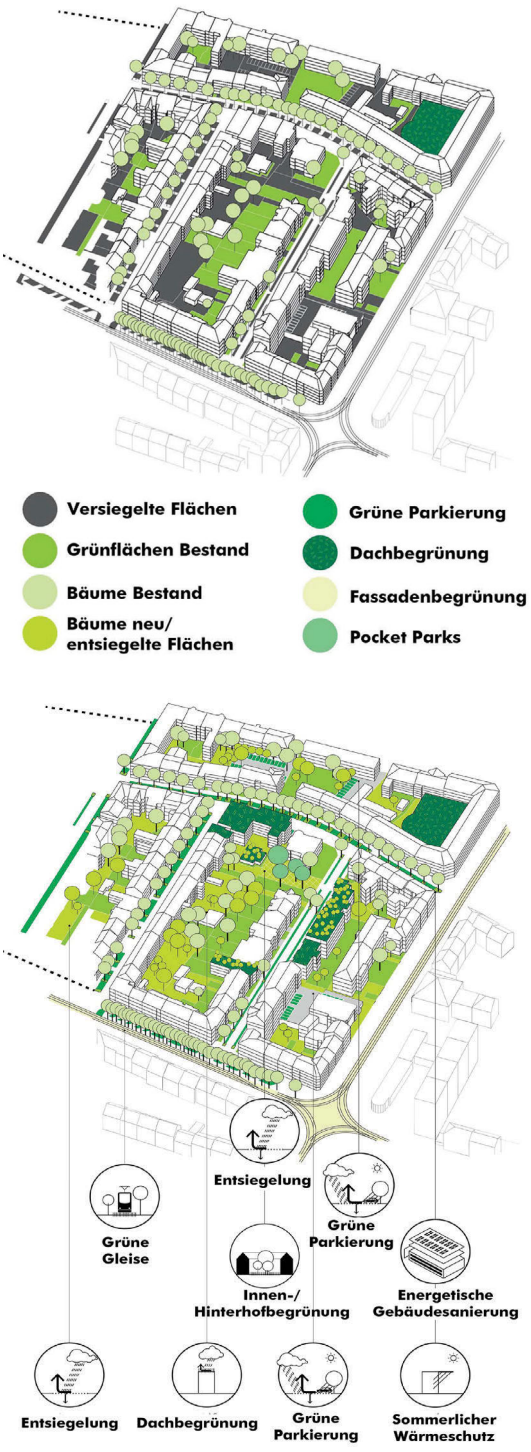


Abb. 6.1-5: *Beispielblock in Karlsruhe ohne (oben) und mit Anpassungsmaßnahmen (unten). Quelle: Stadt Karlsruhe 2015, Grafik: berchtoldkrass space & options, Karlsruhe.*

(Stadt Karlsruhe 2013). Mit dem Rahmenplan Klimaanpassung wurde für das Handlungsfeld Hitze eine fachliche Grundlage geschaffen, die eine ganzheitliche Entscheidungsfindung unterstützt. Der Rahmenplan soll bei der Auswahl von Gebieten für städtebauliche Sanierungsmaßnahmen bzw. für den Stadtumbau, bei der verbindlichen Bauleitplanung im Rahmen der Abwägung, bei städtebaulichen Wettbewerben, bei der Verkehrsplanung sowie bei der Gestaltung öffentlicher Freiräume als Fachgrundlage herangezogen werden (Stadt Karlsruhe 2015a). Ebenfalls soll er bei der Beurteilung von Vorhaben nach § 34 BauGB, bei Anträgen auf Befreiungen nach § 31 BauGB, beim Erwerb oder der Veräußerung von Grundstücken sowie der Ausübung des gemeindlichen Vorkaufsrechts eingesetzt werden.

Der Rahmenplan besteht aus einem Planwerk (vgl. *Abb. 6.1-4*) mit räumlich verorteten Zielformulierungen sowie einem umfassenden Begleitteil (Stadt Karlsruhe 2015b). Letzterer stellt Rahmenbedingen und Maßnahmen zur Reduktion des Hitzeinseleffekts sowie konkrete Maßnahmenvorschläge zur klimatischen Qualifizierung von verschiedenen Stadtstrukturtypen (vgl. *Abb. 6.1-5)* vor. Im Planwerk wird die Belastung der Stadtstrukturtypen dargestellt sowie sensible Nutzungen und Quartiere mit Handlungspriorität gekennzeichnet. Der Plan trifft zudem Aussagen zu Flächen für klimaoptimierte Bebauung, Nachverdichtung und Gestaltung von Freiflächen und zum Ausschluss von Bebauung auf Freiflächen. Bioklimatische Entlastungsflächen werden gekennzeichnet und bewertet. Weitere Darstellungen erfolgen zum Zuwegungssystem zwischen den Entlastungsflächen, welches in 1. Priorität und 2. Priorität klassifiziert ist. Einzelne Komponenten wie Pocket-Parks, Baumbestände im Blockbereich, Innenhöfe mit Entsiegelungs- und Rückbaupotenzial sowie bestehende und potenzielle Orte für Wasserelemente im öffentlichen Raum sind gekennzeichnet.

Instrumente der Sanierung und des Stadtumbaus

Mit der Schaffung von neuem Planrecht über Bebauungspläne wird nur ein kleiner Teil der Bauvorhaben in den Städten realisiert. Eine Vielzahl von Bauvorhaben werden in Bestandsgebieten nach § 30 BauGB auf Basis bestehender Bebauungspläne oder im bebauten Innenbereich nach § 34 BauGB genehmigt. Dabei besteht gerade in diesen Gebieten ein erhöhter Anpassungsbedarf, weshalb Steuerungsinstrumente der Stadtsanierung, des Stadtumbaus und der Städtebauförderung an Bedeutung gewinnen (BBSR 2016). Dem wurde mit der Verankerung der Klimaanpassung

bei den Sanierungszielen zur Behebung städtebaulicher Missstände in die § 136 BauGB Rechnung getragen. Die Ausweisung von Sanierungsgebieten aufgrund von Anpassungserfordernissen an den Klimawandel ist damit grundsätzlich möglich (BBSR 2016). Nach § 136 (4) sollen Sanierungsmaßnahmen auch dazu beitragen, dass die bauliche Struktur nach den allgemeinen Anforderungen an den Klimaschutz und die Klimaanpassung entwickelt wird (Bubeck et al. 2016). Über den § 171a BauGB wurde die Klimaanpassung auch beim Stadtumbau verankert. Erhebliche städtebauliche Funktionsverluste liegen nach § 171a (2) BauGB insbesondere auch dann vor, wenn die allgemeinen Anforderungen an den Klimaschutz und die Klimaanpassung nicht erfüllt werden (BBSR 2016). Von großer Bedeutung ist die Einbindung von Klimaanpassungsmaßnahmen in die zu erstellenden integrierten städtebaulichen Entwicklungskonzepte (BBSR 2016). Neben Maßnahmen im öffentlichen Raum sollten Maßnahmen an privaten Freiflächen und Gebäuden umgesetzt werden.

Schlussbetrachtung

Die kommunale Stadtplanung hat grundsätzlich vielfältige Möglichkeiten, Maßnahmen der Klimaanpassung in ihre Planungsinstrumente zu integrieren. Der Gesetzgeber hat die Grundvoraussetzungen im Baugesetzbuch sowohl für die Stadtentwicklung allgemein, die Bauleitplanung, als auch für Stadtsanierung und Stadtumbau geschaffen. Es deutet sich an, dass die Regelungen im Baugesetzbuch einen ausreichenden Rahmen für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen bieten (UBA 2018). Dagegen stellt sich die Frage, ob eine weitere Normsetzung zur Klärung von Sachverhalten für stadtklimatische und wasserwirtschaftliche Belange erforderlich ist, damit Maßnahmen in Abwägungsprozessen ein stärkeres Gewicht bekommen. Aktuell zeigt sich, dass es insbesondere an den kommunalen Verwaltungen und den politischen Entscheidungsträger liegt, inwieweit insbesondere stadtklimatische Maßnahmen zur Umsetzung kommen (UBA 2019). Dies setzt voraus, dass dort ein ausreichendes Problembewusstsein und die nötige Wissenskompetenz vorhanden sind. Gleiches gilt in der räumlichen und städtebaulichen Planung tätigen externen Akteure. Denn es besteht auch Einigkeit darüber, dass heute bereits viel getan werden kann, sofern das Fachwissen und der politische Wille vorhanden sind (UBA 2018).

Literatur

BauGB (2013): Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23.09.2004 (BGBl. I S. 2414), das zuletzt durch Art. 1 des Gesetzes vom 11.06.2013 (BGBl. I S. 1548) geändert worden ist.

BAUMÜLLER N. (2018): Stadt im Klimawandel. Klimaanpassung in der Stadtplanung. Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente. *http://dx.doi.org/10.18419/opus-9821.*

BBSR (2014): Klimawandel in Stadt und Region. Ergebnisse aus dem Forschungsfeldern ImmoKlima/ImmoRisk/StadtKlima und KlimaMORO. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung.

BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge in durch die Stadtentwicklung. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

BBSR (2016): Klimaresilienter Stadtumbau. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

BMUB (2016): Anpassung an den Klimawandel. Erster Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Deutschen Anpassungsstrategie. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

BUBECK PH., L. KLIMMER & J. ALBRECHT (2016): Klimaanpassung in der rechtlichen Rahmensetzung des Bundes und Auswirkungen auf die Praxis im Raumordnungs-, Städtebau- und Wasserrecht. Natur und Recht (2016) 38. S. 297-307.

BUNDESREGIERUNG (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Berlin.

DST (2012): Positionspapier Anpassung an den Klimawandel - Empfehlungen und Maßnahmen der Städte –. Köln: Deutscher Städtetag.

DST (2019): Anpassung an den Klimawandel in den Städten Forderungen, Hinweise und Anregungen. Berlin und Köln: Deutscher Städtetag.

LHS (2011): Auslobung. Offener Planungswettbewerb Olga-Areal und Umgebung, Stuttgart-West. Endfassung. Stuttgart: Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung.

LHS (2016): Vorlage zum Satzungsbeschluss Bebauungsplan mit Satzung über örtliche Bauvorschriften Schloß-(ehem. Bismarck-)/Hasenberg-/Breitscheid-/ Senefelderstraße, Stuttgart-West (Stgt 258). GRDrs 207/2016. Beschlussfassung am 09.06.2016. Stuttgart.

SPANNOWSKY W. (2016): Bedeutung der Klimaanpassung im Planungsrecht. In: Klima - Stadt - Wandel. Strategien und Projekte für die Klimaanpassung in der Region Stuttgart. Stuttgart: Verband Region Stuttgart. 76-78.

STADT ESSLINGEN (2016): Neuaufstellung Flächennutzungsplan 2030. Vorentwurf vom 28.10.2016. Esslingen: Stadtplanungs- und Stadtmessungsamt. *https://www.esslingen.de/start/es_themen/entwurf+2017.html*, Zugriff vom 28.09.2019.

STADT LUDWIGSBURG (2015): Strategisches Fachkonzept Klimaanpassung. Ludwigsburg: Referat Nachhaltige Stadtentwicklung.

STADT KARLSRUHE (2013): Anpassung an den Klimawandel. Bestandsaufnahme und Strategie für die Stadt Karlsruhe. Karlsruhe: Fachbereich Umwelt und Arbeitsschutz.

STADT KARLSRUHE (2015a): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung (SRKA). Beschlussvorlage 2015/0137. Karlsruhe: Hauptamt - Ratsangelegenheiten.

STADT KARLSRUHE (2015b): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung. Anpassungskomplex »Hitze«. Karlsruhe: Stadtplanungsamt.

STADT FREIBURG (2019): Klimaanpassungskonzept Freiburg. Ein Entwicklungskonzept für das Handlungsfeld Hitze. Freiburg: Stadtplanungsamt.

STADT REGENSBURG (2019): Hinweis auf Klimaresilienzmangerin unter *http://www.regensburg-effizient.de/energie-und-klimaschutz-in-regensburg/.* Zugriff vom 28.09.2019.

STADT STUTTGART (2019): Webseite der Abteilung Stadtklimatologie unter *http://www.stadtklima-stuttgart.de.* Zugriff vom 28.09.2019.

SENSTADT BERLIN (2016): Stadtentwicklungsplan Klima KONKRET. Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt.

UBA (2014): Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Praxishilfe. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

UBA (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

UBA (2019): Umfrage Wirkung der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) für die Kommunen. Teilbericht. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

WGH (2013): Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl I.S. 2585), das durch Artikel 4 Absatz 76 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl I S. 3154) geändert worden ist.

Kontakt:

Dr. Ing. Nicole Baumüller
Stuttgart
nicole.baumueller@gmx.de

Baumüller, N. (2019): Planungsrechtliche Instrumente zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 196-202. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.29.

6.2 Grüne Infrastruktur zur Anpassung an den Klimawandel in Städten

Jürgen Baumüller

Der Klimawandel mit immer höheren Temperaturen und Hitzewellen macht es erforderlich, in den Städten über Anpassungsmaßnahmen an das sich verändernde Klima nachzudenken. Eine Möglichkeit zur Anpassung ist die Verbesserung der grünen Infrastruktur in den Städten. Dies können sowohl kleinräumige aber auch großräumige Maßnahmen, wie z.B. Aufforstungen sein. Die klimatische Wirkung von grüner Infrastruktur wird schon lange untersucht und ist auch gut dokumentiert. Es zeigt sich, dass die klimatische Wirkung des Grüns sich meist auf den Standort selbst beschränkt und keine weitreichende Wirkung feststellbar ist. Im nahen Umfeld des Grüns sind jedoch Verbesserungen bei der Gefühlten Temperatur bis zu 20 Grad möglich, während sich der Einfluss auf die Lufttemperatur nur auf wenige Grad beschränkt. Mit den Hitzewellen ist auch die Gefahr von längerer Trockenheit gegeben, wie die Jahre 2018 und 2019 zeigten. Der Ausbau der grünen Infrastruktur muss deshalb einhergehen mit Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung.

Green infrastructure for adaptation to climate change in cities: *Climate change, with increasing temperatures and heat waves, makes it necessary for cities to think about adapting to the changing climate. One way to adapt is to improve the green infrastructure in the cities. These can be both small-scale and large-scale measures, such as afforestation for example. The climatic effects of green infrastructure have been studied for a long time and are well documented. It turns out that the climatic effect of the green is usually limited to the location itself and no far-reaching effect can be detected. In the immediate vicinity of the green, however, improvements in the sensitive temperature up to 20 degrees are possible, while the influence on the air temperature is limited to only a few degrees. The heat waves also present the risk of prolonged droughts, as the years 2018 and 2019 have shown. The development of the green infrastructure must therefore go hand in hand with rain water management measures.*

Immer mehr Menschen leben in Städten. Bis 2050 rechnet man damit, dass ca. 6,8 Mrd. Menschen (70%) in Städten leben werden. Städte sind in der Regel wärmer als das Umland, speziell in der Nacht. Durch den Klimawandel wird es in vielen Städten im Sommer zusätzlich zu gesundheitlich bedenklichen thermischen Belastungen kommen. Die Anzahl, die Dauer und die Intensität von Hitzewellen werden zunehmen. Die Hitze-Sommer 2015, 2018 und die Extremtemperaturen im Jahr 2019 mit über 40 °C an vielen Orten in Deutschland zeigten auf, welche Belastungen zukünftig zu erwarten sind. Das Potsdam Institut für Klimaforschung (PIK) schließt eine »Heisszeit« mit einer globalen Temperaturerhöhung von bis zu fünf Grad nicht mehr aus.

Im Jahr 2011/13 wurde das Baugesetzbuch (BauGB 2014) dahingehend geändert, dass bei allen Planungen neben dem Klimaschutz auch die Klimaanpassung zu berücksichtigen ist. Wie dies zu geschehen hat, ist dort nicht aufgeführt. Städte haben deshalb inzwischen begonnen, Klimawandelanpassungsstrategien zu erarbeiten, wobei die Themen Hitze, die Trockenheit und der Starkregen im Vordergrund stehen (Wallenborn et al. 2017). Die grüne- aber auch blaue Infrastruktur zeigt gute Möglichkeiten der Anpassung an den Klimawandel in den Städten (BMUB 2017). Mit diesem Thema beschäftigt sich auch die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 8 »Stadtentwicklung im Klimawandel«.



Abb. 6.2-1: *Grüne Infrastruktur als Ausgleich zur Bebauung (Foto: Baumüller).*

Grüne Infrastruktur und Klimawandel

Im Gegensatz von »Grauer Infrastruktur« umfasst die »Grüne Infrastruktur« alle Formen grüner Freiräume und begrünter Gebäude (*Abb. 6.2-1*). Zu der Grünen Infrastruktur zählen große und kleine Parkanlagen, Friedhöfe, Kleingärten, Brachflächen, Spielplätze, Sportflächen, Straßenbegleitgrün, Straßenbäume, Grüne Gleistrassen, Fassadengrün, sowie Naturschutz- und Waldflächen.

Auch private Gärten und landwirtschaftliche Nutzflächen sind ein wichtiger Teil des Grüns in den Städten. Bauwerksgrün mit Fassaden- und Dachbegrünung, Innenraumbegrünung sowie Pflanzen an und auf Infrastruktureinrichtungen gehören ebenfalls dazu. All dieses städtische Grün wird als »Grüne Infrastruktur« bezeichnet.

Die Grüne Infrastruktur erfüllt zahlreiche wirtschaftliche, soziale, gesundheitliche und ökologische Funktionen. Dazu gehört auch der positive Einfluss auf die Regenwasserspeicherung (Baumüller & Ahmadi 2016), das Stadtklima und somit auch auf den Menschen. Im Städtebau das Grün ebenfalls als gestalterisches Element mit ästhetischer Funktion. Eine zusammenfassende Darstellung findet man z. B. bei Baumüller (2018).

Städtische Waldgebiete

Der Wald in Stadtgebieten dient als Wasserschutzwald, Immissionsschutzwald, Klimaschutzwald, Sichtschutzwald und Erholungswald und kann so auch nach dem Waldgesetz der Bundesländer (LWaldG BW 1995/2018) in Waldfunktionskarten ausgewiesen werden.

Im Wald sind die Lufttemperaturen im Sommer am Tage niedriger als im Freiland und in der Stadt. Der Strahlungsumsatz vollzieht sich vorwiegend im oberen Kronenbereich des Waldes und so erwärmt sich der bodennahe Stammraum im Laufe des Tages nur langsam. Temperaturunterschiede am Tage von 36 Grad gegenüber der freien Landschaft und um 48 Grad gegenüber dem Stadtinnern sind möglich. *Abb. 6.22* zeigt die Temperaturverläufe während einer Hitzewelle in Stuttgart im Juni 2014 an verschiedenen Standorten. Deutlich erkennbar sind die niedrigeren Temperaturen im Wald zur Mittagszeit beim Temperaturmaximum, mit Unterschieden bis zu 7 Grad. In der Nacht unterscheidet sich die Temperatur im Wald kaum von denen an den anderen Stationen. Die wohltuende Wirkung des Waldes entfaltet sich also in der Tageszeit, wo die Menschen bei Hitze Kühle suchen. Das entscheidende ist jedoch nicht die Lufttemperatur selbst, sondern die Temperatur, die wir empfinden. Tagsüber kann die »Gefühlte Temperatur« im Wald um über 15 Grad geringer sein als an einem sonnenbeschienen Ort in der Stadt. Der Effekt entsteht hauptsächlich durch die Schattenwirkung der Bäume und durch die Verdunstungskälte bei der Evapotranspiration.

Der Wald dient auch als Luftfilter und bindet Staub und andere feste oder flüssige Schmutzpartikel sowie Schadgase, die in der Luft enthalten sind auf den Ästen und Blättern durch trockene und nasse Deposition. Besonders wirksam sind dichte geschlossene Bestände.

Auch als Retentionsfläche bei Niederschlag ist der Wald hervorragend geeignet (*Abb. 6.2-3*). Bis zu einer Niederschlagsmenge von 20 Liter/m² bei kurzzeitigem Regen findet kein Oberflächenabfluss statt. Bei einem Niederschlag von 60 Liter/m² liegt der Oberflächenabfluss nur bei 10 Liter/m². Der Wald fördert zudem die Grundwasserneubildung.

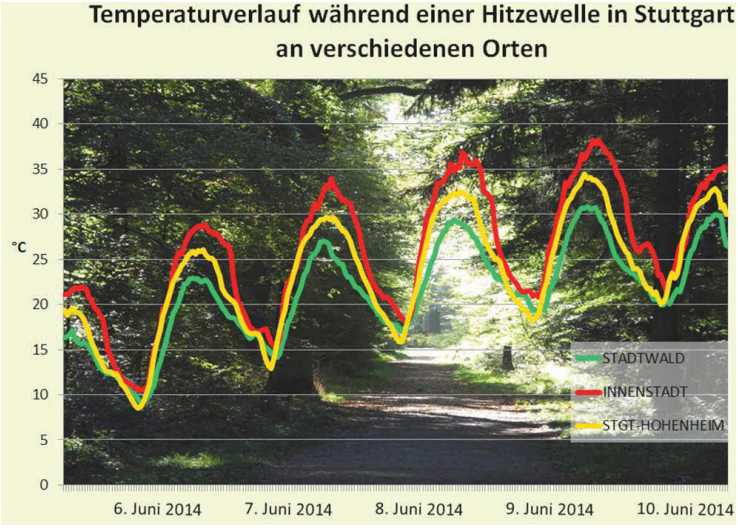


Abb. 6.2-2: *Temperaturverlauf an verschiedenen Standorten in Stuttgart bei einer Hitzewelle (Foto: Baumüller).*

Parkflächen und Pocket-Parks

Eine häufig gestellte Frage ist, ob eine große Grünfläche bzw. Parkfläche klimatisch günstiger ist als mehrere kleine Grünflächen. Die Antwort darauf hängt davon ab, was man mit der Grünfläche klimatisch erreichen will. Das heißt, die Funktion der Grünfläche ist entscheidend. Größere Parkanlagen dienen in der Regel dazu, dass man sich dort länger aufhält. Die Grünausstattung des Parks sollte deshalb abwechslungsreich sein. Neben offenen besonnten Flächen müssen auch verschattete Plätze unter Bäumen angeboten werden (Savannentyp). So hat der Besucher die Möglichkeit je nach Tageszeit, Jahreszeit und aktuellem Wetter, den ihm klimatisch angenehmsten Ort aufzusuchen (*Abb. 6.2-4*).

Soll der Park auch als Kaltluftproduktionsfläche dienen und die Kaltluft die Umgebung positiv beeinflussen, muss der Übergangsbereich zur Bebauung offen gestaltet sein, um der Kaltluft die Möglichkeit zu geben, in bebaute Strukturen einzufliessen. Auch sollte der Park dann keinen zu dichten Baumbestand haben, da sich Wiesen schneller und stärker abkühlen. Der Effekt der Abkühlung innerhalb einer Park- oder Grünfläche wird in der Fachliteratur als »*Park Cool Island*« PCI-Phänomen bezeichnet. Die klimatische Wirkung tagsüber ergibt sich durch Verdunstung und Beschattung.

Die Reichweite der Klimafunktion von Parkanlagen in die Umgebung wird meist überschätzt (Kuttler 2011). Untersuchungen in deutschen Großstädten zeigen den Einwirkungsbereich in die Umgebung bei wenigen 100 Metern (Bongardt 2006), selbst bei großen Parkanlagen (*Abb. 6.2-5*). Der Park und die Grünflächen haben somit in erster Linie den Effekt einer »Kühlinsel« innerhalb der städtischen Wärmeinsel

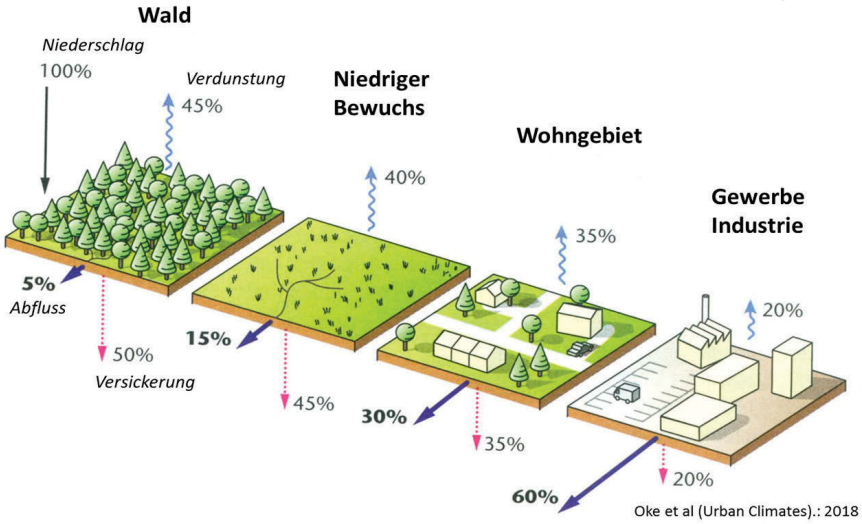


Abb. 6.2-3: *Wasserhaushalt unterschiedlicher Landnutzungen nach Oke et al. (2018), verändert.*



Abb. 6.2-4: *Park für Sonnenhungrige und Kühle Suchende in Stuttgart (Schlossgarten). (Foto: Baumüller).*

so dass die klimatisch günstige Wirkung insbesondere den Besuchern der Grünanlage zugutekommt.

Pocket Parks

Unter Pocket Parks versteht man kleine Parkanlagen im Wohnquartier auch in Kombination mit Spielplätzen für Kinder. Die Ausstattung mit Bäumen bietet an heißen Tagen Schatten (*Abb. 6.2-6*). Bei der Ausbildung mit Mulden können diese Bereiche auch als Retentionsflächen bei Starkregen dienen. Eine Installation von erlebbarem Wasser (Brunnen, Wasserspiele) ist anzustreben. Ein Vorteil solcher Pocket Parks (Grünoasen) ist die räumliche Nähe zum Bürger, womit auch ein kurzer Besuch sinnvoll ist. Die klimatische Wirkung von Pocket-Parks auf das gesamtstädtische Klima darf man nicht überschätzen. Solche Einrichtungen dienen in erster Linie der klimatischen Verbesserung vor Ort, indem durch das Grün Verdunstungskühle erzeugt wird und die Oberflächentemperaturen und Strahlungstemperaturen durch die Verschattung reduziert werden, was die gefühlte Temperatur deutlich absenkt (*Abb. 6.2-7*). Optimal sind solche Pocket-Parks also immer dann, wenn auch schattenspendende Bäume vorhanden sind. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum heute schon gepflanzt werden muss, um in Zukunft, also in 20 oder 30 Jahren einen guten Schatten zu werfen.

Bäume und Baumalleen

Bäume und Baum-Alleen mit zum Teil jahrhundertalte Strukturen bieten sowohl für den Fahrradverkehr als auch für den Fußgänger wohltuenden Schatten. Die Reduktion der Einstrahlung der Sonne ist an heißen Tagen die wichtigste Maßnahme (*Abb. 6.2-8*) und reduziert die Gefühlte Temperatur.

Statt Parkplätze braucht es in den Städten in der Zukunft also mehr »Baumplätze« statt Parkplätze (*Abb. 6.2-9*). Die Hitzesommer 2018 und 2019 mit geringen Niederschlagsmengen haben gezeigt, dass selbst tief-

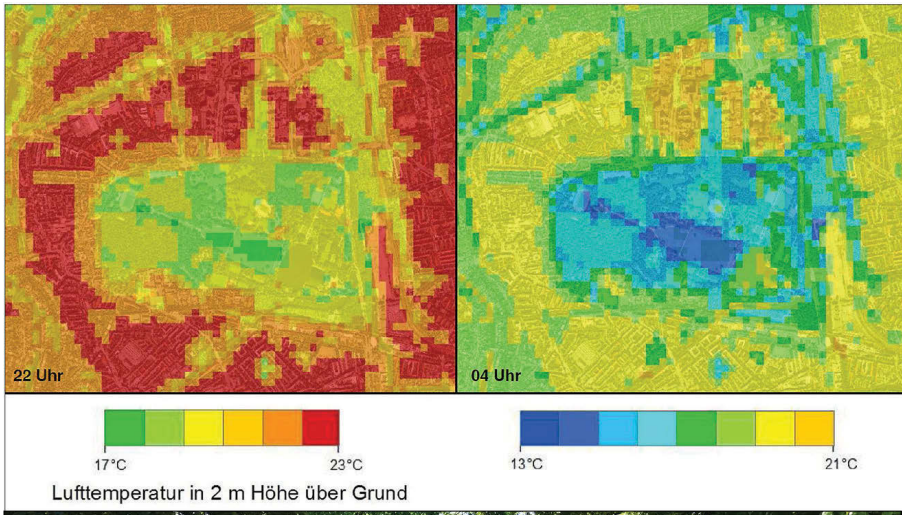


Abb. 6.2-5: *Lufttemperatur im Stadtpark Hamburg in 2 m Höhe über Grund um 22 Uhr (links) und um 04 Uhr (rechts) (Quelle: Hansestadt Hamburg/Geo-Net 2012).*



Abb. 6.2-6: *Pocket-Park mit Kinderspielplatz und reichlich Schatten in Stuttgart (Foto: Baumüller).*



Abb. 6.2-7: »Kühloase« im bebauten Quartier in Stuttgart (Foto: Baumüller).

er wurzelnde Bäume einem erheblichen Trockenstress ausgesetzt waren. Im Sommer 2018 ergab die Wasserbilanz (Niederschlag minus Potentielle Verdunstung) in weiten Teilen von Deutschland ein Defizit von bis zu 250 l/m² (DWD 2018).

Bäume können ihre klimatisch positive Wirkung nur dauerhaft entfalten, wenn ihre Wasser- und Nährstoffsituation gesichert ist. Sie können bis zu einem gewissen Grad eine längere Trockenzeit besser bewältigen als Rasenflächen, bei zu langer Trockenheit kommt es jedoch zu Blattverlusten, was die abschirmende Wirkung der Baumkronen für die Sonneneinstrahlung verschlechtert oder sogar zum Absterben des Baumes führt. Die Diskussion welche Baumsorten in Zukunft als Stadtbäume am besten geeignet sind, ist nach den immensen Baumschäden 2019 voll im Gange.

Gründächer und Dachgärten

Dachbegrünungen können stadtklimatische Defizite in Bezug auf den Feuchtigkeitshaushalt und das thermische Milieu mindern (Höschele et al. 1974). Dazu kommen noch bauphysikalische Vorteile von Dachbegrünungen. Dächer bieten in Städten und Gemeinden bisher vielfach ungenutzte Flächenreserven für die Schaffung von Grünflächen. In den Ballungsgebieten bieten sich Wohn-, Büro- und Industriegebäude zur Begrünung an.

Wenngleich diese Dächer nicht immer aktiv nutzbar sind, z. B. als Sitzplatz im Grünen, so können im

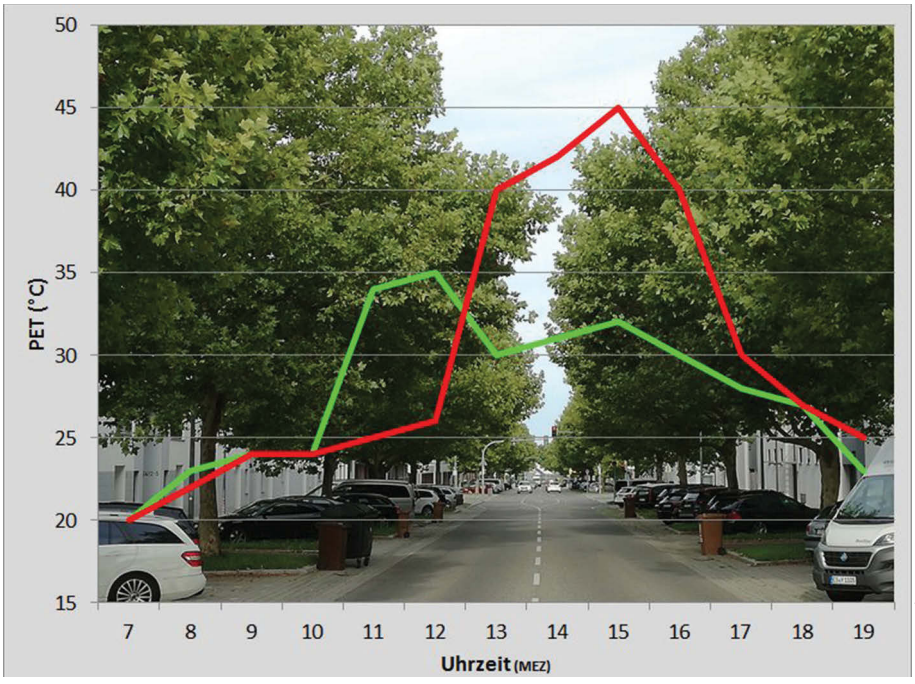


Abb. 6.2-8: Tagesgang der physiologischen Äquivalenttemperatur (PET) an einem Sommertag in einem beschatteten (grüne Kurve) und unbeschatteten (rote Kurve) Straßenabschnitt in München (Mayer 1996) (Foto: Baumüller).

Gegensatz zu monotonen Kies-, Bitumen- oder Blechflächen begrünte Dächer das Klima verbessern, Schadstoffe ausfiltern und Energie bei der Hausheizung einsparen. Eine messbare Fernwirkung kommt begrünten Dachflächen dabei nicht zu.

Positive thermische Effekte von Dachbegrünungen beziehen sich vorwiegend auf die Minderung der Temperaturextreme. *Abb. 6.2-10* zeigt die Temperaturentwicklung auf der Dachhaut von Flachdächern mit unterschiedlichem Aufbau an einem Sommertage mit hoher Einstrahlung. Während Kiesdächer und schwarze Bitumenpappe sich auf etwa 50 °C bis über 80 °C aufheizen, betragen die maximalen Temperaturen bei bepflanzten feuchten Dächern nur etwa 20 °C bis 25 °C.

Im Sommer sind Dachbegrünungen für darunter liegende Räume insgesamt eine wirksame Maßnahme zum Schutz vor sommerlicher Hitze. Sie ersetzen jedoch nicht eine gute Isolation. Im Winter kommt es durch die Vegetation und das Dachsubstrat zu einer Verminderung des Wärmedurchganges und somit zu einer erhöhten Wärmedämmung.

Ein begrüntes Dach ist in der Lage, Oberflächenwasser zu speichern. Je nach Aufbau wird das Nie-



Abb. 6.2-9: *Baumallee in einem Fußgängerbereich in Stuttgart (ca. 30 Jahre alt (Foto: Baumüller).*

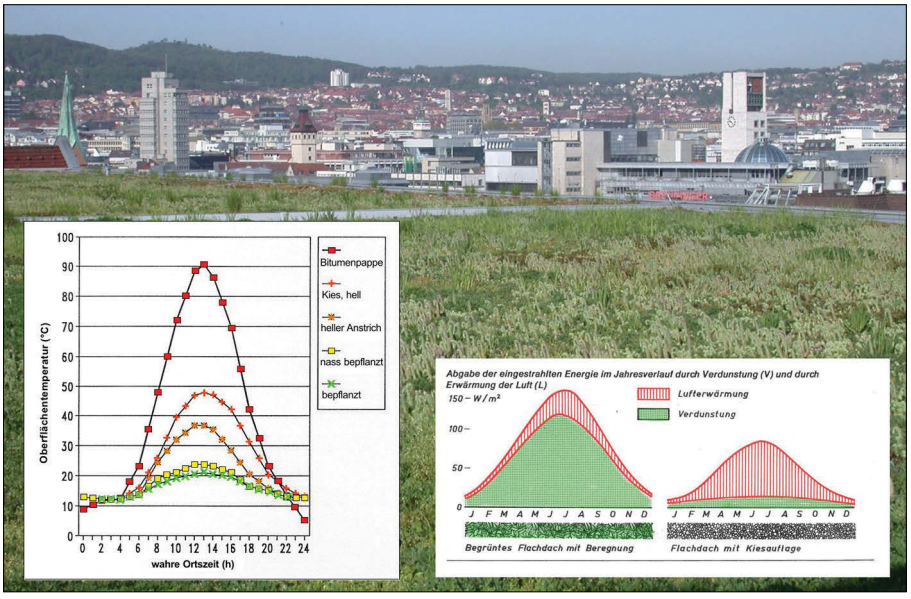


Abb. 6.2-10: *Wirkung von Gründächern auf die Oberflächentemperatur und die Energiebilanz (Gertis & Wolfseher 1977 und Höschele et al. 1974, verändert) (Foto: Baumüller: Dach des Umweltamtes in Stuttgart).*

derschlagswasser unterschiedlich lange in den oberen Schichten gehalten und fließt dann erst abzüglich der Verdunstungs- und Transpirationsrate ab.

Dachbegrünungen können im Bebauungsplan rechtsverbindlich festgesetzt werden. Dabei beruht die Begründung auf § 9 (1) 25 BauGB (2013), der die Gemeinde u.a. zur Festsetzung von Bepflanzungen für Teile baulicher Anlagen ermächtigt.

Im dicht bebauten Quartier kann man die Flachdächer als zusätzlichen Lebensraum nutzen, bei größeren Anlagen als gemeinsame Gärten- und Aufenthaltsbereiche. Nicht nur in heißen Sommerabenden ist dies ein Gewinn für die Nutzer (*Abb. 6.2-11*). Übliche »Sedum-Gründächer« sind zwar pflegeleicht, die klimatische Ausgleichsleistung ist jedoch gering, man sollte zukünftig mehr Grünvolumen auf die Dächer bringen. Bedingt durch zunehmende Trockenheit sind die Dächer möglichst als Retentionsdächer auszuweisen. Nutzbare Gründächer sollten Vorrang vor Fotovoltaik haben, da diese auch anderorts zu leisten ist. Im Einzelfall ist auch eine Kombination von Grün-, Retention- und Solardach möglich.

Fassadengrün

Begrünte Hausfassaden verbessern die klimatischen Bedingungen am Gebäude und in der unmittelbaren Umgebung, die klimatische Fernwirkung ist allerdings gering. Außerdem wirken sie positiv auf die Luftqualität (insbesondere Feinstaub) sowie auf die Energiebilanz des Gebäudes. Die Oberflächentemperatur des Gebäudes wird durch die Fassadenbegrünung deutlich reduziert. Ebenfalls verändern sich an der Fassade die Strahlungsbilanz, die Feuchte (Dampfdruck) und die Windgeschwindigkeit. Die Begrünung von Fassaden

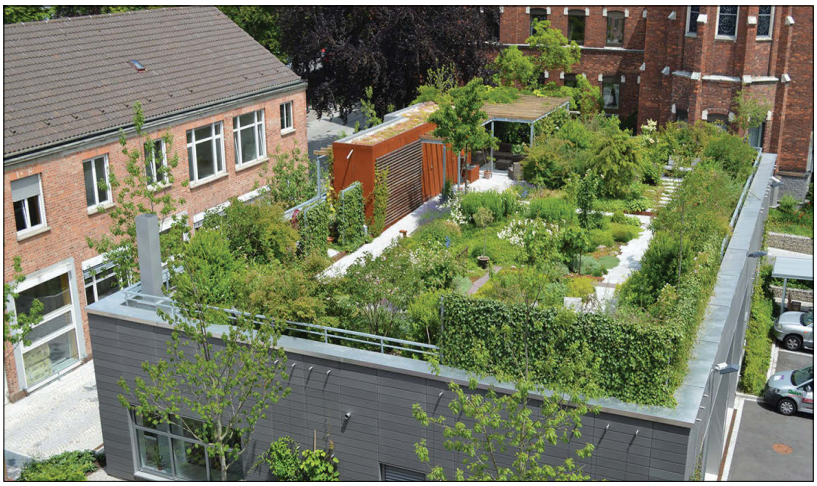


Abb. 6.2-11: *Dachgarten, Wirtschaftsgebäude Diakonissen Klinik Augsburg« Baujahr: 2013. Gesamtfläche: 370 m², (Foto: Optigrün).*



Abb. 6.2-12: *Voluminöse Fassadenbegrünung mit Wisteria in Stuttgart. (Foto: Baumüller)*

erfolgt nicht ausschließlich aus klimatischen und bauphysikalischen Gründen, sondern auch aus ästhetischen (*Abb. 6.2-12*). Eine z.B. mit wildem Wein bewachsene Fassade z.B. verändert ihr Gesicht im Laufe des Jahres und spiegelt damit die Jahreszeiten wider. Auch künstlerische Kreationen sind möglich (*www.verticalgardenpatrickblanc.com*).

Die Maßnahme erfordert wenig Grundfläche. Fassadenbegrünungen können in Bebauungsplänen ebenso rechtsverbindlich im Bebauungsplan festgesetzt werden wie die Dachbegrünung. Von der Einstrahlung (100 %) werden 5-20 % für die Fotosynthese, 5-30 % für die Reflektion, 5-30 % für die Wärmetransmission, 20-40% für die Verdunstung und 10-50 % für die Wärmestrahlung umgesetzt (Köhler 2012).

Eine umfassende Forschungsdokumentation zum Thema »Gebäude Begrünung Energie. Potenziale und Wechselwirkungen« fasst Grundlagen, Untersuchungen, Projektbeispiele zusammen (Pfoser et al. 2013). Die Dokumentation befasst sich sowohl mit klimatischen, wirtschaftlichen als auch mit energetischen Vorteilen.

Begrünte Gleisanlagen

Grüne Gleistrassen zeigen positive klimatische Wirkungen im Straßenraum:

Wasserrückhaltung im Gleis

- im Jahresdurchschnitt: 50-70 % der Niederschlagsmenge



Abb. 6.2-13: *Begrünte Gleisanlagen in Stuttgart, (Foto: Baumüller).*



Abb. 6.2-14: *Parkplatz bei der Universität Stuttgart, beschattet durch Platanen, (Foto: Baumüller).*

- im Sommer bis zu 90 %
- das entspricht je m² Vegetationsfläche im Gleis pro Jahr: 400-550 l

Verdunstung von Regenwasser

- Bei der Verdunstung von 1 l Wasser können 200 m³ Luft um 10 K gekühlt werden,
- je m² begrüntem Gleis können damit in den Sommermonaten ca. 44.000 m³ Luft um 10 K gekühlt werden

Verringerung der Aufheizung im Gleis

- Beitrag durch Verdunstungskühlung
- isolierende Wirkung Schienenaufheizung – ohne Einbettung in Vegetation – Schienentemperatur bis 50-60 °C – mit Vegetation – Schienentemperaturen bis 25-30 °C und
- Beitrag zur Verringerung der lokalen Aufheizung von Innenstadtbereichen.

Schadstoffaufnahme und –rückhaltung

- potenzielle Verringerung der lokalen Feinstaub-/ Schadstoffkonzentration der Luft durch Deposition auf der Vegetationsoberfläche und
- Verminderung der Wiederaufwirbelung von Stäuben im Gleis.

Eine regelmäßige Pflege der begrünten Gleistrassen (Mähen) ist erforderlich. Bei »Sedum-Gleisen« ist dieser Aufwand geringer.

(Quelle: *www.Grüngleisnetzwerk.de*)

Begrünte Parkierungsflächen

Parkplätze müssen nicht aus Asphaltwüsten bestehen. Sie können teilentsiegelt werden, die Gestaltung mit Rasengittersteinen, Schotterrasen und die Verschattung mit Bäumen ist ebenfalls möglich (*Abb. 6.2-14*). Je nach Ausstattung grüner Parkierung kann die Oberflächentemperatur zwischen 70 °C und 30 °C schwanken (Takebayashi & Moriyama 2009) (*Abb. 6.2-15*).

Schlussbetrachtung

Man weiß heute, dass in einer gewachsenen Stadt das Klima insbesondere die Lufttemperatur nur in einem kleinen Umfang geändert werden kann. Bei der Lufttemperatur liegt die Veränderung durch »Grün« in der Größenordnung von 1-2 Grad (Mathey et al. 2012). Eine Ausnahme sind der Wald und sehr große Parkanlagen, wo man 5-8 Grad Temperaturreduktion erreicht.

Einen thermischen Ausgleich zum Klimawandel mit höheren Sommertemperaturen ist dennoch durch eine massive grünblaue Infrastruktur in den Städten möglich. Dabei darf man zukünftig weniger die Lufttemperatur im Blick haben, sondern die »Gefühlte Temperatur«, da diese die entscheidende Größe für das Wohlbefinden der Menschen ist und sich diese viel stärker positiv für den Bürger beeinflussen lässt. Durch geeignete »Grüne Infrastruktur« kann die Gefühlte Temperatur um bis zu 20 Grad reduziert werden, wobei die Verschattung und somit die Reduktion der Strahlungstemperatur die wichtigste Rolle spielt.

Wichtig ist zudem, die Oberflächentemperaturen z.B. durch Begrünung gering zu halten. Auf lokaler Ebene lassen sich so im nahen Umfeld der Menschen grüne »Kühloasen« schaffen.

In den dicht bebauten Innenstädten fehlt es meist am Platz für eine üppige grüne Infrastruktur. Hier bietet sich die Fassadenbegrünung an, die wenig Grundfläche

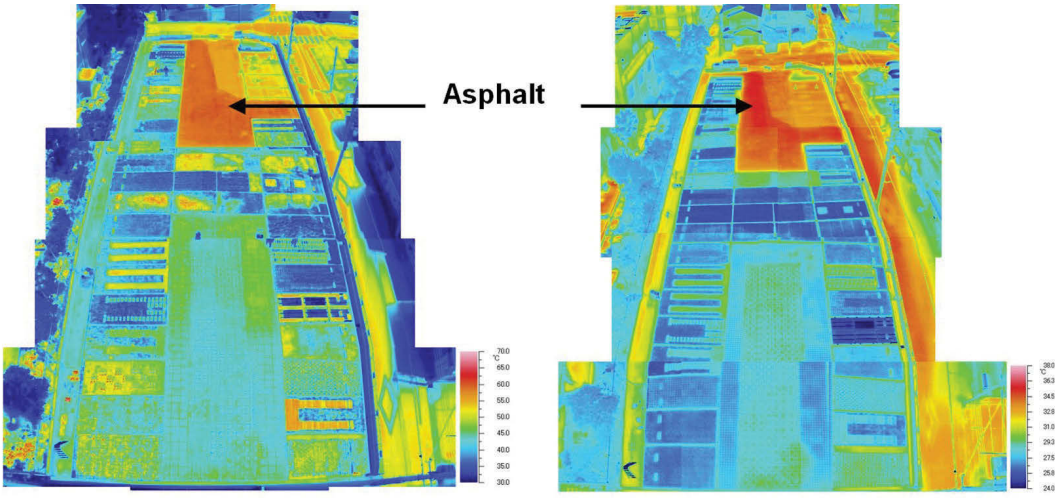


Abb. 6.2-15: *Oberflächentemperaturen von unterschiedlich begrünter Parkierung in Kobe 2005. Links um 12 Uhr, rechts um 21 Uhr (Takebayashi & Moriyama 2009).*

benötigt. Auch Dachbegrünungen auf Flachdächern sind möglich. Weiterer Raum für Grün kann erreicht werden, wenn man den Autoverkehr reduziert und »Baumplätze« statt »Parkplätze« kreiert. Dies trägt zu einer lebenswerteren Stadt bei.

Stadtquartiere sollten zukünftig zu einer urban dichten »Gartenstadt« entwickelt werden, neues grünes Wohnen in dichten Strukturen (Senatsverwaltung Berlin 2015). Dabei geht es weniger um eine Erweiterung der vorhandenen großen Parkanlagen, sondern um eine bürgernahe klimatisch wirksame grüne Infrastruktur.

Man muss zukünftig mit längeren Trockenzeiten und Starkregenfällen im Sommer rechnen. Deshalb ist es notwendig parallel zur grünen Infrastruktur ein Regenwassermanagement in den Städten zu etablieren.

Literatur

BauGB (2013/14): Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634).

BAUMÜLLER J. & Y AHMADI (2016): Beitrag von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen und freiraumplanerischen Gestaltungselementen zur Verbesserung des Stadtklimas. *http://www.samuwa.de/publikationen/* (Zugriff 04.09.2018).

BAUMÜLLER J. (2019): Grüne Stadt in heißen Zeiten – grüne Infrastruktur als Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel, UVP Report 4/18. 168-176.

BAUMÜLLER N. (2018): Stadt im Klimawandel – Klimaanpassung in der Stadtplanung Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente, Dissertation Universität Stuttgart, 304 S. (*https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/9838*).

BMUB (2017): Weißbuch Stadtgrün – Grün in der Stadt-Für eine lebenswerte Zukunft, Hrsg. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

BONGARDT B. (2006): Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. Essener Ökologische Schriften Band 24, Hohenwarsleben, Westarp-Verlag.

DWD (2018): Trockenstress pur für die landwirtschaft im sommer 2018; *https://www.dwd.de/de/fachnutzer/landwirtschaft/berichte/3-2-rueckblicke/2018/bericht_sommer_2018.pdf?-blob=publicationfile&v=2l* (Abfrage 04. sept. 2019).

GERTIS K. & U. WOLFSEHER (1977): Veränderungen des thermischen Mikroklimas durch Bebauung, Gesundheits-Ingenieur 1/2, S.1-10.

HANSESTADT HAMBURG; GEO-NET (2012): Stadtklimatische Bestandsaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg-Klimaanalyse und Klimawandelszenario 2050. Hamburg: Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Freie Hansestadt Hamburg und Geo-Net Umweltconsulting GmbH Hannover.

HÖSCHELE K. & H. SCHMIDT (1974): Klimatische Wirkung einer Dachbegrünung, Garten und Landschaft 6/74: 1-4.

KÖHLER M. (2012): Handbuch Bauwerksbegrünung Planung-Konstruktion-Ausführung-Kosten, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, Köln.

KUTTLER W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich - Teil 1 Wirkungen, Environmental Sciences Europe 23/11, Springer open, S. 1-12. doi: 10.1186/2190-4715-23-11.

LWaldG BW (1995/2018): Waldgesetz für Baden-Württemberg, Landeswaldgesetz LWaldG, 1995 in der Fassung von 19. Juni 2018 (GBl. S. 223).

MATHEY J., S. RÖSSLER, I. LEHMANN & A. BRÄUER (2012): Anpassung an den Klimawandel durch Stadtgrün - klimatische Ausgleichspotenziale städtischer Vegetationsstrukturen und planerische Aspekte; Nachhaltiges Flächenmanagement von Industrie- und Gewerbebrachen 2012, 17–20; Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein.

MAYER H. (1996): Human-biometeorologische Probleme des Stadtklimas, Geowissenschaften 14/1996 Heft 6: 233-239.

OKE T. R., G. MILLS, A. CHRISTEN & J. A. VOOGT (2018): Urban Climate, Cambridge University Press.

PFOSER N., N. JENNER, J. HENRICH, J. HEUSINGER & ST. WEBER (2013): Gebäude Begrünung Energie. Potenziale und Wechselwirkungen. Abschlussbericht. Darmstadt, Braunschweig, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Architektur und Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie.

TAKEBAYASHI H. & M. MORIYAMA (2009): Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking. Solar Energy 83, 1211-1223.

VDI 3787 Bl. 8 (2019): Stadtentwicklung im Klimawandel, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b: Umweltmeteorologie.

WALLENBORN T., S. BÜHLER-KÖLMEL, N. PREUSSNER & J. BAUMÜLLER (2017): Grüne Stadt in heißen Zeiten - Strategisches Fachkonzept Klimaanpassung Ludwigsburg, Stadt+Grün (3/2017).

Kontakt:
Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Baumüller
Stuttgart
juergen.baumueller@web.de

Baumüller J. (2019): Grüne Infrastruktur zur Anpassung an den Klimawandel in Städten. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 203-212. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.30.

6.3 Einfluss von Bauwerksbegrünung und Wohnumfeldgrün auf die menschliche Gesundheit

Sandra Meyer, Ben Gabriel,
Rainer vom Lehn & Peter-Diedrich Hansen

In der Diskussion um gesunde Städte und Stressoren auf die menschliche Gesundheit sowie um die ökologischen Rahmenbedingungen Wohnen und Arbeiten in der Stadt werden oft die übergreifenden Zusammenhänge vernachlässigt. In diesem Kapitel soll gezeigt werden, dass die menschliche Gesundheit durch Begrünung von Bauwerken positiv beeinflusst wird und gleichzeitig resiliente urbane Orte trotz stadtklimatischer Veränderungen entstehen können. Anhand von Beispielen werden die verschiedenen Nutzungsarten von Wohnen und Gewerbe sowie die Dringlichkeit von »weichen« Faktoren für die Realisierung von Bauwerken gezeigt. Es werden Strategien zur Leistungsfähigkeit von Bauwerksbegrünung und zum Monitoring diskutiert.

***Human Health responses by the greening of buildings and the nearby living environments:** There is a discussion concerning healthy cities and stressors on human health as well as ecological frame criteria of urban living. But the overall coherences are missing. The human health and the increasing positive influences of green constructions will be demonstrated in this chapter. There will be changes in urban climate but even then there will occur at the same time resilient urban places. Some examples will be given to analyze living and working spaces concerning so-called »soft indicators« for realization of housing und building. Strategies for »effects monitoring« will be discussed concerning efficiency of constructions and greening.*

Menschliche Gesundheit

Aufgrund der immer stärker voranschreitenden Urbanisierung und der baulichen Verdichtung stellt sich immer stärker die Frage nach Beeinflussungsmöglichkeiten der menschlichen Gesundheit auf der kleinteiligen Ebene von Gebäuden und deren Frei- und Grünumfelder. Für Neubaugebiete bietet das Baugesetzbuch (2018) in der Bauleitplanung Möglichkeiten durch Pflanzgebote und Bindungen für Bepflanzungen, sowie Dach- und Fassadenbegrünungen (BauGB § 9 Abs. 1 Nr. 25 in Verbindung mit § 1a). Diese Möglichkeiten sind aber bei einem Anteil an Neubauten von unter 10% (Nagel 2019) bei einer Gesamtbilanzierung im Rahmen der Gesamtbebauung eher gering. Verlassen wir den Steuerungsbereich kleinmaßstäblicher und kommunaler Planung verschiebt sich der Blick schnell in das nahe Umfeld von Wohn- und Arbeitsumfeldern. Die Eigentumsverhältnisse sind in diesem Bereich weg vom öffentlichen Eigentum hin zu privaten Eigentümern geprägt. Auf dieser Ebene spielen die Adressierung und Wirkung von Einzelmaßnahmen der Begrünung eine essentielle Rolle. Zahlreiche gesundheitsrelevante Ökosystemdienstleistungen bietet bei Nutzungsarten wie Gewerbe, Büro- oder Wohnen das Umfeldgrün, das mit seinen aktivierten Flächen zur Reduktion von vielfältigen Belastungen beiträgt. Die Deutsche Anpassungsstrategie für den Klimawandel (DAS) sieht für das Handlungsfeld »Menschliche Gesundheit« die Reduzierung der Hitzebelastung und die Verbesserung des Lokal- und Bioklimas als Handlungsoption (Umweltbundesamt 2016). Zentral sind hier die Reduktion der Feinstaubbelastungen und die Minimierung der Wirkung von thermischen Stressoren mittels Begrünung gemeint. Es entsteht damit Abkühlung in einer Höhe von 2 m durch Entzug der Verdunstungswärme von bis zu 4,3 °C (Bauman 1985, Schmidt 2019) auf den Vegetationsflächen einer Fassaden- oder Dachbegrünung (siehe hierzu Kap. 6.2 Baumüller - in diesem Band). Nach der Adsorption der Feinstäube mit ihren Kontaminanten ($PM_{2,5}$; PM_{10}) folgt gegebenenfalls mit den hierfür geeigneten Biomarkern der Pflanzen eine Biotransformation, wobei die Schadstoffe zum Teil metabolisiert werden. Um den Zusammenhang zu den gesundheitsbezogenen Folgewirkungen im Sinne einer Vorsorge zu erfassen, gibt es geeignete Strategien und Maßnahmen im Rahmen eines Humanbiomonitorings und eines gesundheitsbezogenen Umweltschutzes. Besonders gut geeignet sind die quantitativen nichtinvasiven Methoden mit so genannten »Effektmarkern« wie z. B. die Erfassung und Quantifizierung der Mikrokernbildung von Epithelzellen in der Mundhöhle (Bloching et al. 2000a, 2000b). Mittels einfacher Speichelentnahme (Abstrich) werden die Mukosazellen aus Mund- oder Nasenhöhle entnommen (Bloching et al 2000a). Es wird die erhöhte Anzahl der bei einer Stressbelastung gebildeten Mikrokerne im Vergleich zur Gesamtzellzahl ausgewertet. Es zeigt sich, dass 90 % aller bösartigen Tumore epithelialer Herkunft sind. Die verstärkte Bildung der Mikrokerne in der Mund- und Nasenhöhle beim Menschen ist als Stressindikator zur Erkennung der Leistungsfähigkeit einer Begrünung ein Beitrag zur Erfassung des Gesundheitsstatus (Bocking et al. 2000b) bei exponierten Bewohnern und Arbeitern in der Stadt. Zusätzlich lässt sich zur Erfassung und Bewertung »gesunder Standorte« in der Stadt das Testverfahren zur »Prüfung auf Mikrokerne« bei den exponierten Pflanzen im Gebäude-Umfeldgrün an den jeweiligen Standorten einsetzen.

Die verstärkte Bildung der Mikrokerne als Stressindikator ist zur Erkennung der Leistungsfähigkeit einer Begrünung ein Beitrag zur Erfassung des Gesundheitsstatus (Boching et al. 2000b) beim exponierten Bewohner und Arbeiter in der Stadt. Zu dem Stadtklima im städtischen Außenraum kommen die Immissionen durch die Baustoffe der Gebäude noch als weitere Stresskomponenten von den Innenraumbelastungen hinzu. Die Ausgasung aus den verwendeten Baustoffen und Bauhilfsstoffen wie z.B. Isoliermassen, Kleber und Kunststoffe sowie Weichmacher (z.B. Diethylhexylphthalat) genutzt als Fugenmaterialien, Beschichtungsmaterialien und Lacke spielen für die Innenraumhygiene und den Gesundheitsstatus der Bewohner eine wichtige Rolle. Zusammenfassend spricht man bei den Folgewirkungen einer Innenraumbelastung durch flüchtige organische Verbindungen (VOC) und staubgebundene organische Verbindungen (POM) von dem »*Sickbuilding Syndrom* (SBS)«. Das SBS ist eine nach WHO »epidemiologisch klassifizierte Kenngröße«. Nach internationaler Konvention wird von einem SBS gesprochen, wenn mehr als 10-20% der Nutzer eines Gebäudes über Befindlichkeitsstörungen und Beschwerden klagen.

Stadtklimatische Rahmenbedingungen und Erfordernisse für die Bau- und Immobilienwirtschaft

In den Städten und urbanen Siedlungsstrukturen sind in der Regel die Nutzungsarten durchmischt und über bereits ausgelastete Infra- und Verkehrsstrukturen mit einander verbunden. Die intensive Nutzung und die CO_2-ausstoßende Mobilität erhöhen die Feinstaubemissionen und die negativen Effekte auf die Luftqualität, das Lärmempfinden und weitere Stressoren auf den Menschen. Oft kulminieren die negativen Effekte stadt- und sozialräumlich in Gebieten, in denen Menschen mit geringer Ausstattung an Kapital leben und kaum Möglichkeiten besitzen, um von diesen mehrfachbelasteten Orten wegzuziehen (Klimeczek 2016). Die gesetzliche Grundlage des Raumordnungs-, Bau- und Planungsrechts hat zwar ordnenden und einflussnehmenden Charakter, schreibt gesundheitsrelevante Maßnahmen vor, reguliert den Eingriff und den Ausgleich bei Flächeninanspruchnahme, hat aber auf Grundstücksebene nur minderen Einfluss, was die Begrünung und Entsiegelung angeht. Hier haben aber Länder wie Frankreich, insbesondere Paris mit Grünsatzungen auf Gebäudeebene geeignete Steuerungsmöglichkeiten geschaffen. Es stellt sich die Frage, welche Gründe die Immobilienunternehmen und -eigentümer sowie Baudienstleister (Planer und bauausführende Firmen) dazu bewegen, den Immobilienbestand zu begrünen.

Im Folgenden werden zwei Fallstudien betrachtet. Die erste Fallstudie ist der Nutzungsart Gewerbeimmobilien zuzuordnen, während sich die zweite Fallstudie mit der Nutzungsart der Wohnimmobilen beschäftigt.

Fallstudien zur Bauwerksbegrünung

Fallstudie Wohnen

Ausgangslage: Im Bereich des Wohnens – der Wohnung und näheren Wohnumgebung – berühren sich zwei sehr unterschiedliche Zugänge zur Gestaltung der Städte und damit der Möglichkeit, mehr Grün als Ausgleich zu vielfältigen Stressoren in den konkreten Lebensraum der Bewohner zu bringen. Auf der einen Seite stellt der Wohnbereich ein lebensweltliches Setting der Bewohner dar, in dem alltägliches Erleben, konkrete Nutzungen und Handlungen stattfinden, Flächen und Räume auf eine spezifische Weise angeeignet werden können. Auf der anderen Seite ist dieser Raum ein Verhandlungsobjekt von Planern, Immobilienunternehmen, Investoren und vielen weiteren Akteuren. Diese konzeptualisieren diesen Raum als objekthaften, Raum, der überform-, plan- und optimierbar ist. Er kann im Falle immobilienwirtschaftlicher Akteure zur Generierung von Erlösen oder zur Investition von bestimmten Kosten herhalten. Diese kann z. B. ein Wohnungsangebot schaffen oder erneuern und somit auch die Quantität und Qualität der Frei- und Grünräume des Wohnumfelds ausgestalten. Im Falle des öffentlichen Raums, der auch zum Wohnumfeld zählt, besitzt die Stadt oder Kommune zahlreiche gestalterische sowie rechtliche Einflussmöglichkeiten, solange die kommunale Finanzausstattung dies zulässt. Es können Bäume, Straßenbegleitgrün, Parks und Grünflächen errichtet bzw. biodivers und vielfältig umgestaltet werden. Allerdings steigt der Druck auf diese Flächen durch politische und planerische Vorgaben der Verdichtung der Städte. Damit stehen Grünflächen unter einem starken Nutzungsdruck. Die vielfältigen Nutzeransprüche von Bewohnern, Tier- und Pflanzenwelt und den unterschiedlichen Nutzergruppen wie Kinder, Jugendliche, Erwachsene oder Ältere sowie auch Touristen stehen größtenteils in einem Nutzungskonflikt zueinander. Hierzu haben die Bundesregierung und mehrere staatliche Institutionen durch den Fördermitteleinsatz wegweisende Strategien entwickelt und den Umgang mit Grün der Stadt zu mindestens aus kommunaler und zivilgesellschaftlicher Sicht gestärkt – Publikationen wie das Weißbuch Stadtgrün (BMUB 2017) oder Urbane Freiraumqualitäten (BBSR 2018), um nur einige

zu nennen, tragen dazu bei. Der Druck, Wohnraum zu schaffen, heizt die Konkurrenz zwischen Wohnfläche und Grünfläche jedoch weiter an. Die entstehenden Wohngebäude sowie deren Wohnfolgenutzungen benötigten verkehrlichen Infrastrukturen und versiegeln noch vorhandene Flächenreserven. Die Kompensation von Vegetation und Freiräumen muss somit über eine Bauwerksbegrünung (Dettmar et al. 2016) und ein Wohnumfeldgrün (HSR 2018) erzielt werden. Damit verlässt der Staat aber seinen direkten Einflussbereich, den er zwar über Rechtsinstrumente und Fördergelder teilweise steuern kann, jedoch überlässt er weitgehend das Feld der ökologisch hochwertigen Gestaltung den privatwirtschaftlichen Akteuren.

Ergebnisse einer gesundheitsorientierten wohnungswirtschaftlichen Forschung: In diesem Rahmen hat sich das Forschungsprojekt *Healthy Living*[1] an der TU Berlin mit dem Bereich der städtischen, kleinteiligen Grünflächen beschäftigt. Es konnte nachgewiesen werden, dass vielfältige Grünflächen und Bepflanzungen vermehrt im hochpreisigen Wohnungsbau zur Anwendung kommen, Genossenschaften, Baugemeinschaften und andere Träger von Wohnungsbauvorhaben suchen jedoch aktiv nach neuen Lösungen im Umgang mit Grünflächen und Bauwerkgrün. Das Spektrum reicht von einfachen Begrünungen von Hof- und Brandmauern mit Kletterpflanzen, bis hin zu größeren und aufwendigen Fassadenbegrünungen mit Modul- oder Kübeleinheiten. Die gute fachliche Kooperation von Architekten und Landschaftsarchitekten wirkt sich nicht nur auf einen hohen ökologischen, sondern auch auf einen hohen sozio-kulturellen Mehrwert für die Bewohner aus. So kann durch die Teilhabe der Bewohner an ihrem Wohnumfeld und den jahreszeitlich bedingten Vegetationsrhythmen von wachsendem Obst und Gemüse, Schnittblumen etc. eine Stärkung der Identität und Verantwortung der Bewohner gegenüber ihrer Wohnumgebung erreicht werden. Gleichzeitig beeinflusst der erhöhte Grünanteil das Stadtklima.

Fallstudie Gewerbe

Wirtschaftlichkeitsanalyse von Bauwerksbegrünung und Gewerbeumfeldgrün bei Gewerbeimmobilien

Ausgangslage: Gewerbeimmobilien wie des Lebensmitteleinzelhandels, der Bau- und Möbelmärkte sowie im Bereich der Logistik verfügen über große Dach- und Fassadenflächen, die sich zur Begrünung eignen. Durch Dachbegrünung kann bis zu 75 % des Jahresniederschlages (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 2010) zurückgehalten (sogenannte Schwammstädte), eventuell gespeichert werden und somit verdunsten, sodass ein kühlender Effekt auf die bodennahe Atmosphäre in urbanen Gebieten erzielt werden kann. Das Gewerbeumfeldgrün in Form von Bäumen, Hecken und Rasen- bzw. Beetflächen, ist darüber hinaus geeignet, zur notwendigen Verschattung der Gebäude beizutragen. Die Nutzung des Potenzials begrünbarer Flächen kann somit einen wirksamen Beitrag zur Verbesserung der thermischen stadtklimatischen Parameter leisten.

Berechnungsmodell und Datenauswertung

Für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse erfolgte zunächst eine Erweiterung des Immobilienlebens-Zykluskostenmodells (*Life Cycle Costs* – LCC) zur Abbildung der Kosten von Bauwerksbegrünung (Pelzeter 2006). Dieses erweiterte Modell sollte sich eignen, um die Auswirkungen von Bauwerksbegrünung auf die Kosten zu ermitteln. Darüber hinaus sollten »weiche« Faktoren, die nicht unmittelbar monetär ermittelbar sind, analysiert und die Auswirkungen von Bauwerksbegrünung auf die Kosten im Immobilienlebenszyklus qualitativ dargestellt werden (*Abb. 6.3-1*). Bei »weichen« Faktoren handelt es sich z.B. um den Immobilienwert, die Produktivität der Arbeitnehmer, die Anzahl der Krankheitstage von Arbeitnehmern, die Vermietbarkeit der Immobilie sowie Biodiversität. Diese stellen in der Gesamtbetrachtung ein ebenso wichtiges Element dar wie die direkt ermittelbaren Lebenszykluskosten. Wir unterstellen, dass für eine ganzheitliche Lösung, qualitative und quantitative Faktoren gleichwertig zu betrachten sind.

Für die einzelnen Phasen des Immobilienlebenszyklus wurden zur Erstellung der Wirtschaftlichkeitsanalyse von Bauwerksbegrünung Anpassungen vorgenommen (Meyer 2018). Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde das erstellte Berechnungsmodell je einmal für die Bestands- und Neubauimmobilie für die Dachbegrünung und die Fassadenbegrünung und das Gewerbeumfeldgrün angewandt. Um eine Aussage zu den jährlich anfallenden Kosten treffen zu können, wurden die jeweiligen Kostenarten durch die Jahre der Lebensdauer der Immobilie (50 Neubau, 20 Jahre Bestandsimmobilie) geteilt.

Ergebnisse - Dachbegrünung

Für beide Untersuchungsstandorte erfolgt die Ermittlung der Kosten auf Basis der Annahme einer geplanten Begrünung mit einer extensiven Sedum-Moos-Kraut-Vegetation mit einer Substratschicht von ca. 8 cm.

[1] *Das Projekt wurde an der TU Berlin durchgeführt und durch die Fritz und Hildegard Berg-Stiftung im Deutschen Stifterzentrum gefördert. Zwei der Autoren waren in diesem Projekt eingebunden. https://www.immobilienwirtschaft.tu-berlin.de/menue/forschung/healthyliving/*

Tab. 6.3-1: Wirtschaftlichkeitsanalyse Dachbegrünung (Bestand und Neubau), eigene Berechnung

Berechung der Kosten für eine extensive Dachbegrünung im Vergleich zum unbegrünten Dach
Untersuchungsstandort I (Bestand)

Untersuchungsstandort I (Bestand)	Fläche in m²	Kosten pro m²	Gesamtkosten bei RND 20 Jahre	Gesamtkosten Dachbegrünung je Kostenart/Jahr	Fläche in m²	Kosten pro m²	Gesamtkosten bei RND 20 Jahre	Gesamtkosten unbegrüntes Dach je Kostenart/Jahr
Anschaffungskosten:Material+Aufbau	665	37.00 €	24,605.00 €	1,230.25 €	-	- €	- €	- €
Pflegekosten	665	1.23 €	16,359.00 €	817.95 €	665	0.90 €	11,970.00 €	598.50 €
Instandsetzungs-, Sanierungskosten	-	- €	- €	- €	665	30.00 €	19,950.00 €	997.50 €
Niederschlagswassergebühr	333	1.84 €	12,236.00 €	611.80 €	700	1.84 €	25,760.00 €	1,288.00 €
Entsorgungskosten	665	9.12 €	6,064.80 €	303.24 €	-	- €	- €	- €
Gesamtkosten			59,264.80 €	**2,963.24 €**			57,680.00 €	**2,884.00 €**

Berechung der Kosten für eine extensive Dachbegrünung im Vergleich zum unbegrünten Dach
Untersuchungsstandort II (Neubau)

Untersuchungsstandort II (Neubau)	Fläche in m²	Kosten pro m²	Gesamtkosten bei RND 50 Jahre	Gesamtkosten Dachbegrünung je Kostenart/Jahr	Fläche in m²	Kosten pro m²	Gesamtkosten bei RND 50 Jahre	Gesamtkosten unbegrüntes Dach je Kostenart/Jahr
Anschaffungskosten:Material+Aufbau	8,624	37.00 €	319,088.00 €	6,381.76 €	-	- €	- €	- €
Pflegekosten	8,624	1.23 €	530,376.00 €	10,607.52 €	8,624	0.90 €	388,080.00 €	7,761.60 €
Instandsetzungs-, Sanierungskosten	-	- €	- €	- €	8,624	30.00 €	258,720.00 €	5,174.40 €
Niederschlagswassergebühr	4,312	1.84 €	396,704.00 €	7,934.08 €	9,618	1.84 €	884,856.00 €	17,697.12 €
Entsorgungskosten	8,624	9.12 €	78,650.88 €	1,573.02 €	-	- €	- €	- €
Gesamtkosten			1,324,818.88 €	**26,496.38 €**			1,531,656.00 €	**30,633.12 €**

Tab. 6.3-2: Wirtschaftlichkeitsanalyse Fassadenbegrünung (Bestand und Neubau), eigene Berechnung

Berechung der Kosten für eine Fassadenbegrünung im Vergleich zu einer unbegrünten Fassade
Untersuchungsstandort I (Bestand)

Untersuchungsstandort I (Bestand)	Menge	Kosten pro Stück	Gesamtkosten bei RND 20 Jahre	Gesamtkosten Fassadenbegrünung je Kostenart/Jahr	Menge	Kosten pro Stück	Gesamtk. bei RND 20 Jahre	Gesamtkosten unbegrünte Fasade je Kostenart/Jahr
Anschaffungskosten:Material+Aufbau	123 St.	7.00 €	861.00 €	43.05 €	-	- €	- €	- €
Pflegekosten	-	- €	- €	- €	-	- €	- €	- €
Instandsetzung-, Sanierungskosten	-	- €	- €	- €	-	- €	- €	- €
Entsorgungskosten	1.230 m²	10.00 €	12,300.00 €	615.00 €	-	- €	- €	- €
Gesamtkosten			13,161.00 €	**658.05 €**			- €	**- €**

Berechung der Kosten für eine Fassadenbegrünung im Vergleich zu einer unbegrünten Fassade
Untersuchungsstandort II (Neubau)

Untersuchungsstandort II (Neubau)	Menge	Kosten pro Stück	Gesamtkosten bei RND 50 Jahre	Gesamtkosten Fassadenbegrünung je Kostenart pro Jahr	Menge	Kosten pro Stück	Gesamtkosten bei RND 50 Jahre	Gesamtkosten unbegrünte Fasade je Kostenart pro
Anschaffungskosten:Material+Aufbau	16 St.	7.00 €	112.00 €	2.24 €	-	- €	- €	- €
Anschaffungskosten (Rankgitter)	1.021 m²	120.00 €	122,520.00 €	2,450.40 €	-	- €	- €	- €
Pflegekosten	-	- €	- €	- €	-	- €	- €	- €
Instandsetzung-, Sanierungskosten	-	- €	- €	- €	-	- €	- €	- €
Entsorgungskosten	1.021 m²	10.00 €	10,210.00 €	204.20 €	-	- €	- €	- €
Gesamtkosten			132,842.00 €	**2,656.84 €**			- €	**- €**

Im Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse (*Tab. 6.3-1*) konnte festgestellt werden, dass bei Bestandsgebäuden (geringe Restnutzungsdauer) mit einer kleineren Dachflächenbegrünung die jährlichen Kosten (ca 2.963 €) geringfügig höher sind, als bei einem unbegrünten Dach (ca. 2.884 €). Eine Dachbegrünung ist somit für Bestandsgebäude eine ökonomische Möglichkeit als Anpassungsmaßnahme zum Klimawandel.

Ergebnisse - Fassadenbegrünung

Bei beiden Untersuchungsstandorten erfolgte eine bodengebundene Fassadenbegrünung. Bei der Bestandsimmobilie wird von einer Begrünung mit Efeu ausgegangen. Hier fallen keine weiteren Kosten für eine Rankhilfe an. Bei den Neubauimmobilien wird die Begrünung mit Wildem Wein (Vitaceae) auf Grund der Struktur der Fassade mit einer Rankhilfe angebracht, was zu zusätzlichen Kosten führt (*Abb. 6.3-2*).

Aus *Tab. 6.3-2* geht hervor, dass die Fassadenbegrünungen für die beiden Untersuchungsstandorte aufgrund der Anschaffungs- und Entsorgungskosten als Mehrkosten zu verzeichnen sind.

Schlussfolgerungen der Fallstudie

Die Implementierung von Bauwerksbegrünung führt in den einzelnen Lebenszyklusphasen zu Mehr- bzw. Minderkosten. Bei der Errichtung von Bauwerksbegrünung kommt es zu erhöhten Kosten. Während der Nutzungsphase können diese Kosten durch einen geringeren Instandhaltungsaufwand, verbesserten Kühlungs- und Wärmedämmungseffekt und geringe Gebühren jedoch amortisiert werden, sodass die Implementierung von Bauwerksbegrünung in der Gesamtbetrachtung wirtschaftlich ist. Hinzu kommt die Verbesserung »weicher« Faktoren (*Abb. 6.3-1*), die in der Regel nur schwer ermittelbar sind, wie der Einfluss auf den Immobilienwert, Attraktivität für das Wohnumfeld, Lärmschutz, Biodiversität oder Produktivität der Arbeitnehmer.

In *Abb. 6.3-1* erfolgt die Visualisierung der Bewertung (Rating 1-10) der »weichen Faktoren«. Die Rangfolge oder das »Rating System« orientiert sich an international üblichen Standards und erfolgt über die Betrachtung der Ausgangssituation im Verhältnis zum Zielwert mit und ohne einer Bauwerksbegrünung, hieraus erschließt sich der Zielerreichungsgrad. Für die Rangfolge ergibt sich: Rang 1-2 = »best practice«; Rang 5 = akzeptabler Mittelwert; Rang 8-9 = schlechteste Bewertung; Rang 10 = KO Kriterium (schlechtester Wert) und Rang 3,4,6,7 = Zwischenwerte.

Bei dem Einsatz von Bauwerksbegrünung ist immer eine detaillierte Analyse vorzunehmen, da die Kosten für die Implementierung von der Art des Gebäudes, den zur Verfügung stehenden Flächen und der Restnutzungsdauer des Gebäudes abhängig sind. Diese Kosten sind den Vorteilen für die Gesundheit und dem Klimaschutz gegenüber zu stellen.

Leistungsfähigkeit der Bauwerksbegrünung, Monitoring und Bewertung

Für eine Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Begrünungsmaßnahmen stellt sich insbesondere die Frage, wie sich die Qualität eines (Wohn-) Umfeldgrüns auf die menschliche Gesundheit auswirkt. Können die Ökosystemleistungen einer Bauwerksbegrünung mit dem Gesundheitsstatus der Bewohner und auf den Standort bezogen korreliert werden? Es ist eine

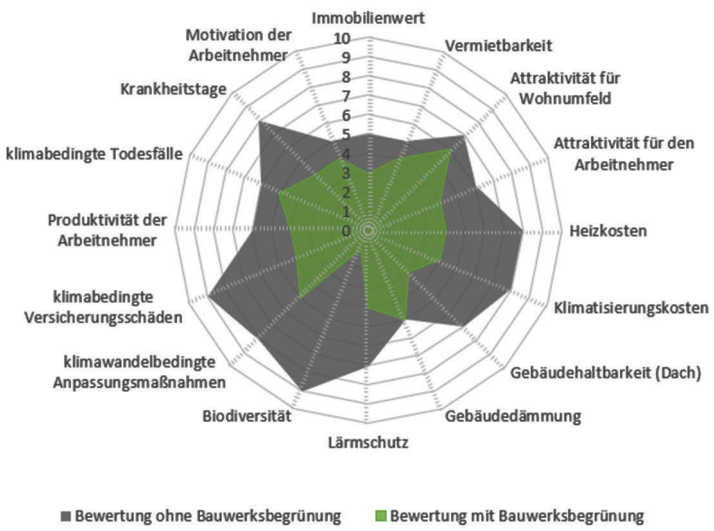


Abb. 6.3-1: *Bewertung der Wirtschaftlichkeitsanalyse mit und ohne Bauwerksbegrünung der »weichen« Faktoren, eigene Darstellung, modifiziert nach EVA.S (Hansen et al. 2013)*

Bewertung von Praxisbeispielen (Hansen et al. 2013, Schmidt 2019) erforderlich, hierzu werden Kriterien und Indikatoren erhoben, insbesondere auch solche im Zusammenhang mit den »weichen« (*Abb. 6.3-1*) und harten Faktoren (*Tab. 6.3-2*).

Die Bauwerksbegrünung bietet die Möglichkeit, im kleinräumlichen Maßstab bei einem wachsenden Nutzungsdruck in den Städten den Bewohnern der Städte »gesunde Lebensumstände« (BauGB § 1) zu gewährleisten. Das Wohnumfeldgrün wäre ein Komplementärraum zum verdichteten und auf geringer Wohnfläche stattfindenden Wohnen. Das Nachhaltigkeitskonzept hätte so eine materielle Basis. Die Aufstellung von Standardisierungen zur Bewertung unter Einbeziehung weicher Faktoren ist für die Immobilienwirtschaft notwendig.

Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Empfehlungen

Die zunehmende Urbanisierung und Stadtverdichtung haben in der Folgewirkung der thermischen, visuellen, akustischen und weiteren Stressindikatoren einen Einfluss auf die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit der Stadtbewohner. Diese nachhaltigen Effekte wie eine neurotoxische, gentoxische, erbgutverändernde Wirkung beeinflussen den Gesundheitsstatus und letztlich die Leistungsfähigkeit der Stadtbevölkerung.

Städte potenzieren die negativen Effekte aus urbanen Wärmeinseln, globaler Erwärmung und überdurchschnittlicher Schadstoffbelastungen, aber insgesamt geringeren Belastbarkeit der anthropogenen Systeme, da sich diese Systeme nicht in einem natürlichen Gleichgewicht befinden. Die Erhöhung der durchschnittlichen Temperatur um 1 °C in Mitteleuropa entspricht der Verlagerung der Stadt um 200 km nach Süden. Zum Erhalt der Leistungsfähigkeit einer Stadtbevölkerung spielt zunehmend der thermische, visuelle sowie akustische Komfort und eine gute Luftqualität sowie die Reduzierung von Geruch eine Rolle (s. Kap. 6.7 Schubert et al. - in diesem Band).

Wie durch die Fallstudie gezeigt, haben Bauwerksbegrünung und ein gut ausgestattetes Gewerbe- bzw. Wohnumfeldgrün einen positiven Einfluss auf das städtische Mikroklima. Da es in Städten überwiegend Bestandsgebäude gibt, kommt der Bauwerksbegrünung und dem Umfeldgrün eine prominente Bedeutung zu. Ein Bewertungssystem ist für Aufklärung und Akzeptanz unabdingbar.

In diesem Bewertungssystem müssen »harte« und »weiche« Faktoren im Rahmen einer Indikatorenbetrachtung gleichberechtigt nebeneinanderstehen. Besonders große Potentiale ergeben sich im Bereich von Gewerbeimmobilien. Bauwerkbegrünung und Umfeldgrün sind nicht kostenneutral. Den Kosten sind die positiven Effekte gegenüberzustellen.

Empfehlungen für eine Systematisierung zur Begrünung der Stadt und die multidisziplinäre Zusammenarbeit der Akteure:

Betrachtet man das (Wohn-)Umfeld systematisch,



Abb. 6.3-2: *Dach- und Fasaden-Begrünung in der Stadt (Fotos: 2a. S. Meyer; 2b M. Schmidt; 2c B. Gabriel, 2d P.-D. Hansen).*

so ergeben sich unterschiedliche Typologien und Flächen, die für Begrünungsmaßnahmen zur Verfügung stehen. Momentan sind Flächen wie Fassaden und Dächer als Erweiterung der herkömmlichen Flächen wie Höfe, Vorgärten, Wohnungseingänge und -zuwegungen, Beete und naheliegende Freiräume in der Diskussion von Stadtentwicklung, Raumplanung oder Architektur. Das Ziel ist es, weitere Flächen der Stadt für eine ökologisch sinnvolle Aktivierung bei wenig vorhandenen Restflächen bereitzustellen. In Frankreich ist die Bauwerksbegrünung bereits durch kommunal festgelegte Grünsatzungen festgeschrieben. Dies führt dazu, dass Planer und Architekten stärker mit dem Einfluss von Grün in die Gestaltung eines Gebäudes und deren Nutzungsfreundlichkeit experimentieren und Synergien hinführend zu einen guten »Stand der menschlichen Gesundheit« im städtischen Raum entwickeln können. Für einen progressiven Umgang sollten Experten wie Gesundheitswissenschaftler, Epidemiologen, Ökologen, Umwelt- und Psychologen und andere eine interdisziplinäre Zusammenarbeit anstreben. Unterstützend müssen einheitliche Regelungen im Bereich der Kompensationsplanung geschaffen werden. Auch für die Bestandsimmobilien müssen klare Regelungen aufgestellt werden. In der Bauleitplanung müssen die bestehenden Festsetzungsmöglichkeiten konsequent genutzt werden. Ein Monitoring und eine Evaluierung von Projekten kann hierzu beitragen, insbesondere um Architekten die vermeintliche Angst zu nehmen, die Bauwerksbegrünung könne die Gestaltung und Ästhetik des Gebäudeentwurfs zerstören und sie dafür sensibel zu machen, dass das Gebäude mit seinen umliegenden Grünflächen maßgeblichen Einfluss auf die Gesundheit nicht nur seiner Bewohner, sondern auch der Stadtgesellschaft hat. Entscheidend ist aber die Aufklärung der Bürger insbesondere hinsichtlich der Gesundheitsrelevanz, um eine positive Grundhaltung für eine Verstärkung von Bauwerksbegrünung und Umfeldgrün zu erreichen.

Literatur

BAUGESETZBUCH (2018): Neugefasst durch Bekanntmachung vom 03.11.2017 I 3634. 50. Auflage 2018, Beck Texte im dtv.

BAUMANN R. (1985): Pflanzen halten im Sommer kühl In: Baumann R., Begrünte Architektur. Verlag Callwey, München, 31 S. ISBN 3766707663.

BLOCHING M., A. HOFMANN, A. BERGHAUS, C. LAUTENSCHLÄGER & T. GRUMMT (2000a): Mikrokerne als Biomarker zum Nachweis der Feldkanzerisierung im oberen Aerodigestivtrakt. HNO, Volume 48, Issue 6, 444-450.

BLOCHING M, A. HOFMANN, C. LAUTENSCHLÄGER, A. BERGHAUS & T. GRUMMT (2000b): Exfoliative cytology of normal buccal mucosa to predict the relative risk of cancer in the upper aerodigestive tract using the MN-assay. Oral Oncol. 36(6): 550-5.

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung) (2018): Urbane Freiräume. Qualifizierung, Rückgewinnung und Sicherung urbaner Frei- und Grünräume. Handlungsempfehlungen für die kommunale Praxis. Bonn, ISBN: 978-3-87994-236-7.

BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2017): Weißbuch Stadtgrün - Grün in der Stadt für eine lebenswerte Zukunft, BMUB. *http://www.bmub.bund.de/ service/publikationen/downloads/details/artikel/weissbuch-stadtgruen/ (*April 2017).

DETTMAR J., N. PFOSER & S. SIEBER (2016): Gutachten Fassadenbegrünung. Vorschlag für Zweck, Umfang und Gebietskulisse einer finanziellen Förderung von quartierorientierten Unterstützungsansätzen von Fassadenbegrünungen. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKUNLV) NRW, erstellt durch die Technische Universität Darmstadt, FB Architektur, Fachgebiet Entwerfen und Freiraumplanung, Darmstadt 2016. *https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/klima/gutachten_fassadenbegruenung.pdf.*

HANSEN P.-D., B. GABRIEL, H. LIEBRENZ, S. HERIG & R. VOM LEHN (2013): Eva.S: Evaluation, Strategies and Data Processing of Indicator Values. Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN 978-3-7983-2587-6, pp 18.

HSR (Hochschule für Technik Rapperswil – Kompetenzzentrum Wohnumfeld) (2018): Wohnumfeldqualität. Kriterien und Handlungsansätze für die Planung. Shaker Verlag, Aachen 2018. ISBN 978-3-8440-5984-7. *http://www.wohnumfeld-qualitaet.ch/assets/Uploads/PDF/Handbuch-Wohnumfeldqualitaet-2018.pdf.*

KLIMECZEK H.-J. (2016): Handlungsfeld »Umweltgerechtigkeit« – Strategien und Maßnahmen auf der Senats- und bezirklichen Ebene. In: Umweltgerechtigkeit im Land Berlin – Arbeits- und Entscheidungsgrundlagen für die sozialräumliche Umweltpolitik. (Hrsg.) Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Abt. IX, 2016, 266-275.

MEYER S. (2018): Einfluss von Bauwerksbegrünung / Gewerbeumfeldgrün in Gewerbegebieten auf das Stadtklima insbesondere hinsichtlich menschlicher Gesundheit und unter Berücksichtigung der Mehr- und Minderkosten im Immobilienzyklus. Masterarbeit (Matrikelnummer 0376710) TU Berlin, pp 59, 43 ff, 45 ff.

NAGEL R. (2019): Präsentation der Bundesstiftung Baukultur zum Baukulturbericht 2018/19.

PELZETER A. (2006): Lebenszykluskosten von Immobilien: Einfluss von Lage, Gestaltung und Umwelt, Schriften zur Immobilienökonomie, 36, Müller, Köln. 32 S. ISBN 3-89984-156-5.

SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG BERLIN (Hrsg.), (2010) Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung. Berlin, S. 11 ff.

SCHMIDT, M. (2019): Kletterpflanzen für den Klimaschutz, Fassadenbegrünung, GEB, 07/08, 16-19.

UMWELTBUNDESAMT (2016): Klimaanpassung in der räumlichen Planung. 109 S.

Kontakt:
Sandra Meyer, M.Sc. REM
Ben Gabriel, Dipl.-Ing.
Rainer vom Lehn, M.Sc., REM
Prof. Dr. Peter-Diedrich Hansen
TU Berlin, REM, Real Estate Management
Institut für Ökologie
peter-diedrich.hansen@tu-berlin.de

Meyer S., B. Gabriel, R. vom Lehn & P.-D. Hansen (2019): Einfluss von Bauwerkbegrünung und Wohnumfeldgrün auf die menschliche Gesundheit. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. 213-220. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.31.

6.4 Anpassung an den Klimawandel in Städten: Herausforderungen und Politikinstrumente

Petra Mahrenholz & Andreas Vetter

Städte stehen vor Herausforderungen durch Folgen der rasch zunehmenden Erderhitzung und anderen Wandelprozessen. Unzureichende Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel manifestieren sich in wachsenden Zahlen von hitzebedingter Übersterblichkeit - sogenannten Hitzetoten - und volkswirtschaftlichen Schäden. Lösungsansätze finden sich in transformativer Nachhaltigkeitspolitik, welche Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel einschließt. Kommunen haben im letzten Jahrzehnt sukzessive mit Klimawandelvorsorge begonnen und nutzen dabei Instrumente, die von der EU, dem Bund und den Ländern zur Verfügung gestellt werden. In der Breite der kommunalen Landschaft spielt dieses Aufgabenfeld allerdings weiterhin nur eine untergeordnete Rolle. Zusätzliche Anstrengungen der Kommunen sollten sich auf die Anpassung urbaner Infrastrukturen konzentrieren und eine resiliente Stadtgesellschaft zum Ziel haben.

Adaptation to Climate Change in German Cities: Challenges and Policy Instruments: *Cities are challenged by the consequences of rapidly increasing global warming and other drivers of changes. Inadequate measures to adapt to climate change are manifested in growing numbers of heat-related excess mortality and economic damage. Transformative sustainability policies deliver approaches for action and solutions. Adaptation measures should be incorporated in these transformative approaches. Cities have gradually implemented adaptation measures over the last decade, using policy instruments provided by the EU, the federal government and the federal states. However, compared to their manifold task areas adaptation to climate change still only plays a subordinate role. Municipalities should focus additional efforts on adapting urban infrastructures under the umbrella of shaping a resilient urban society.*

Städte stehen heute vor vielen, miteinander verknüpften Herausforderungen. Hierzu gehören neben dem Klimawandel vor allem die Digitalisierung, die Globalisierung der Märkte und regional unterschiedliche Demografietrends. Ohnehin laufende Wandlungsprozesse umweltverträglich zu gestalten, ist meist Teil heutiger Stadtpolitik. Mit spezifischen Ansätzen der transformativen Umweltpolitik, in welches ein Konzept zu Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel eingebettet sein sollte, können Kommunen eine Nachhaltigkeitstransformation bewusst fördern und gestalten. Häufig greifen hierfür Veränderungen in Kultur, Werten, Technologien, Infrastrukturen, Produktion, Konsumtion und Politik ineinander und verstärken sich wechselseitig (UBA 2018).

Gerade Infrastrukturen – welche hier als sozio-technische Systeme verstanden werden – sind von diesen Wandelprozessen betroffen. Schwerpunkte für Anpassungsmaßnahmen in Städten fokussieren deshalb oft auf Extremereignisse, weil von Ihnen in besonderem Maße Risiken ausgehen: Hitzewellen, die insbesondere über das Stadt- und Innenraumklima sowie die Luftqualität die menschliche Gesundheit beeinträchtigen und Schäden an (Verkehrs-) Infrastruktur verursachen. Abnehmende Bodenwassergehalte und eingeschränkte Wasserverfügbarkeit sowie daraus resultierende Nutzungskonflikte, z.B. für städtische Grünflächen bilden einen zweiten Schwerpunkt. Flussüberschwemmungen, Starkregen und Sturzfluten verursachen Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen, gefährden den Warenverkehr und beeinträchtigen Kanalnetze und Kläranlagen (Buth et al. 2015).

Das Monitoring des gegenwärtig rasch voranschreitenden Klimawandels unterstreicht die Dringlichkeit für wirksame Gegenmaßnahmen: die Hitzewelle 2003 verursachte deutschlandweit 7.500 zusätzliche Todesfälle, jene in 2006 und 2015 jeweils 6.000 (UBA 2019a). Im Sommer 2018 starben in Berlin 490 Menschen aufgrund der Hitzeeinwirkung (RKI 2019). Im Juli 2019 wurden in Deutschland erstmals Lufttemperaturen über 42°C gemessen (DWD 2019). Mit steigenden Temperaturen sind ansteigende bodennahe Ozonkonzentrationen zu erwarten. Bereits jetzt sind vor allem Städter vom Anstieg der Ozonkonzentration betroffen (UBA 2019c). Für Deutschland wird für den Zeitraum 2021-2050 (vgl. zu 1976-2005) eine Zunahme der Überschreitungstage des Zielwertes zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Tage mit einem maximalen 8-Stunden-Mittelwert über 120 µg/m³) um über 30 Prozent erwartet. Lokal, insbesondere in Süddeutschland, könnte es sogar zu Erhöhungen um 100 bis 200 Prozent kommen (Pavlik et al. 2016).

Die Bodenfeuchte zeigt für die letzten Jahre im Vergleich zur Mitte des 20. Jahrhunderts in vielen Teilen Deutschlands eine extreme, tws. auch außergewöhnliche Dürre (UFZ 2019). Vor allem in der zurückliegenden Dekade traten vermehrt sehr niedrige Grundwasserstände auf. Die Aufrechterhaltung einer in allen Teilen Deutschlands ausreichenden und zugleich nachhaltigen Versorgung mit Trink- und Brauchwasser gerät deswegen zunehmend in den Blick. Kontrastiert wird dies mit seit der Jahrtausendwende immer wieder auftretenden Starkniederschlägen sowie extremen Hochwasserereignissen (UBA 2019a). Das Schadenspotential für Wohngebäude, durch Sturmfluten und Starkregen geschädigt zu werden,

steigt bis 2030 aufgrund zunehmender Eigentumswerte – insbesondere in Städten – auf einen jährlichen dreistelligen Milliardenbetrag (vgl. UBA 2019b). Aufgrund des Klimawandels kann der erwartete jährliche Schaden für die kritische Infrastruktur bis Ende des Jahrhunderts v.a. in Süddeutschland auf mehrere hundert Millionen Euro anwachsen (Forzieri et al. 2018). Deswegen ist es sinnvoll, bei der Anpassung an den Klimawandel auf die Gestaltung gesundheitsfördernder Bedingungen sowie klimaresilienter Infrastrukturen zu fokussieren. Da die Anpassung an den Klimawandel physische wie sozio-ökonomische Grenzen hat, sollten Städte diese Maßnahmen immer mit ambitionierten Klimaschutzmaßnahmen, wie nachhaltigen Verkehrskonzepten, koppeln, um die globale Überhitzung einzudämmen.

Wie passen sich Städte in Deutschland dem Klimawandel an?

Viele Städte in Deutschland betreiben Anpassung an den Klimawandel. So werden Straßen und Plätze begrünt, Flussläufe renaturiert oder Gebäude gedämmt sowie mit Gründächern und Verschattungselementen versehen. Auch die planerische Sicherung von Kaltluftentstehungsgebieten oder die Ausweisung von Hochwasserrisikogebieten gehören zum Repertoire einer vorsorgenden Anpassung an den Klimawandel. Allerdings weisen fehlende kommunale Konzepte zur Vorsorge gegenüber Starkregenereignissen und Hitzeperioden darauf hin, dass hohe Schadensminderungs-Potentiale noch unzureichend genutzt werden (vgl. UBA 2019d).

Für eine gezielte Entwicklung resilienter Städte bedarf es daher einer strategischen Vorgehensweise. Ausgehend von einem politischen Beschluss zur Anpassung an den Klimawandel sollten die konkreten Klimarisiken vor Ort identifiziert und an diesen ausgerichtet geeignete Anpassungsmaßnahmen konzipiert und umgesetzt werden. Das Monitoring und die Evaluierung eines in diesem Prozess aufgestellten Klimawandelanpassungskonzeptes ermöglichen es, die Maßnahmen zielgerichtet weiterzuentwickeln und deren Wirksamkeit aufzuzeigen.

Eine Online-Befragung deutscher Kommunen verdeutlicht, dass diese vor allem dann aktiv werden, wenn sie selbst von extremen Wetterereignissen betroffen waren. Da potenziell jede Stadt Starkregen und Hitzewellen erfahren kann und diese Ereignisse zu erheblichen Schäden führen können, ist eine proaktive Vorgehensweise angebracht. Zumindest 40 Prozent der befragten Kommunen geben an, einen politischen Beschluss zur Erarbeitung von Anpassungsstrategien oder -konzepten vorliegen oder in Arbeit zu haben und die Mehrheit plant und setzt Maßnahmen zur Klimawandelanpassung bereits um (UBA 2019d).

Klimawandelanpassung ist eine Querschnittsaufgabe, welche erfordert, dass unterschiedliche Arbeitseinheiten in den Städten kooperieren und gemeinsam Lösungen zur Anpassung an den Klimawandel erarbeiten und abstimmen. Es ist daher naheliegend, amtsübergreifende städtische Arbeitsgruppen zu bilden (vgl. auch BBSR 2016). Dies haben jedoch erst knapp ein Viertel der befragten Kommunen umgesetzt. Fast die Hälfte der befragten Kommunen beabsichtigt die Einrichtung einer solchen Arbeitsgruppe derzeit nicht (siehe *Abb. 6.4-1*).

Städte gehen bei der Anpassung an den Klimawandel inkrementell vor, d.h. sie setzen in einem schrittweisen Prozess Maßnahmen auf, um klimaangepasste Städte zu entwickeln. Es bedarf eines dauerhaften Monitorings und weiterer Forschung, um zu klären, ob mit den bisher im Vordergrund stehenden Praktiken und Anpassungsoptionen ausreichend wirksam eine nachhaltige Anpassung städtischer Strukturen an den Klimawandel erreicht werden kann. Gegebenenfalls müssen weiterreichende Transformationen zu einer klimaresilienten Stadtentwicklung gestaltet werden,

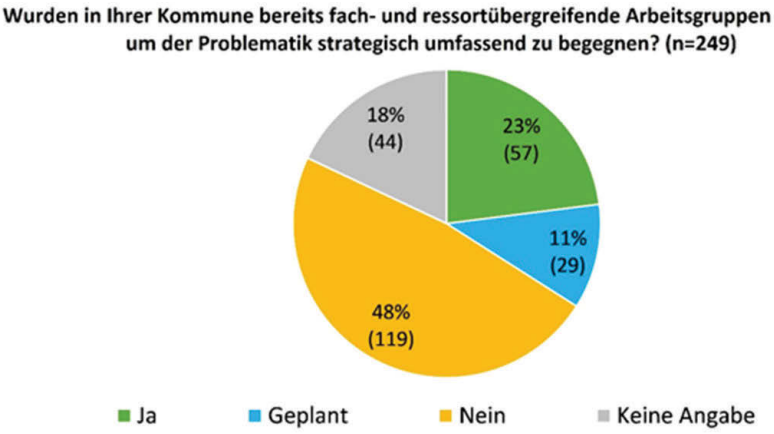


Abb. 6.4-1: *Einrichtung fach- und ressortübergreifender Arbeitsgruppen für Klimawandelanpassung (UBA 2019d).*

welche einen grundsätzlicheren Wandel bestehender Vorgehensweisen und Lösungsansätze bedeuten.

Welche Barrieren bremsen städtische Anpassung an den Klimawandel und wie können diese überwunden werden?

Die Ergebnisse der vorgestellten Befragung zeigen, dass zumindest für ein Drittel der Kommunen Klimawandelanpassung noch gar keine Rolle spielt. Bei diesen liegt noch kein politischer Beschluss, kein Maßnahmenprogramm und auch kein anderes Konzept oder Instrument zur Klimawandelanpassung vor beziehungsweise ist nichts dergleichen geplant. Ebenfalls ein Drittel der befragten Kommunen stehen keine Personalkapazitäten für kommunale Klimawandelanpassung zur Verfügung. Nur wenige haben mehr als eine Vollzeitstelle für dieses Thema ausgewiesen (UBA 2019d). Dementsprechend sehen die Kommunen knappe Ressourcen zur Vorbereitung und Umsetzung von Klimawandelanpassung als das stärkste Hemmnis. Weitere Barrieren liegen vor, wenn Erfahrungen mit Maßnahmen fehlen oder die Datengrundlagen nur unzureichend verfügbar sind. Zudem bremst eine geringe Akzeptanz in der Bevölkerung bei der lokalen Politik oder in der Verwaltung Klimawandelanpassungsaktivitäten aus (siehe *Abb. 6.4-2*).

Insbesondere das prioritäre Thema menschliche Gesundheit bildet sich oft unzureichend in städtischen Klimawandelanpassungsstrategien ab. Neben der bereits erwähnten Ressourcenknappheit liegen die Gründe auch in einer mangelnden gesetzlichen Grundlage. Das Thema gehört nicht zu den Pflichtaufgaben der Gesundheitsämter und wird daher vor dem Hintergrund des Handlungsdrucks anderer Aufgaben geringer priorisiert (vgl. Universität Bielefeld 2014).

Gemeinsam von Stadtverwaltung und Forschungsinstitutionen aufgesetzte Projekte können Hemmnisse reduzieren. Jedoch müssen auch hier Barrieren berücksichtigt werden, wie die unterschiedlichen Zeitskalen von Forschungsvorhaben und Umsetzungsprozessen, die geringen Kapazitäten der Kommunen und fehlende Netzwerke außerhalb von den »Leuchttürmen« (IMA Stadt 2017).

Die Barrieren verdeutlichen, dass es für die erfolgreiche Umsetzung von Klimawandelanpassung eines schrittweisen Aufbaus von kommunalen Kapazitäten einschließlich der Einbindung des Themas in – ggf. neu einzurichtende – querschnittsorientierte Organisationsstrukturen der Städte bedarf. Um die Akzeptanz des Themas in Stadtpolitik und Bevölkerung zu stärken, sollte Klimawandelanpassung mit positiven Entwicklungszielen und Leitbildern wie der »lebenswerten Stadt« verknüpft werden (vgl. UBA 2016). Ziele und Maßnahmen der Klimawandelanpassung können auch in solche Strategien und Prozesse integriert werden, die einen hohen Stellenwert in der Stadtpolitik und -verwaltung besitzen.

Um Anpassung an den Klimawandel dauerhaft als städtische Aufgabe zu etablieren und erfolgreich umzusetzen, sollten unterschiedliche städtische und regionale Akteure in den Prozess einbezogen werden. Abhängig vom Ziel der Beteiligung existiert eine Vielzahl

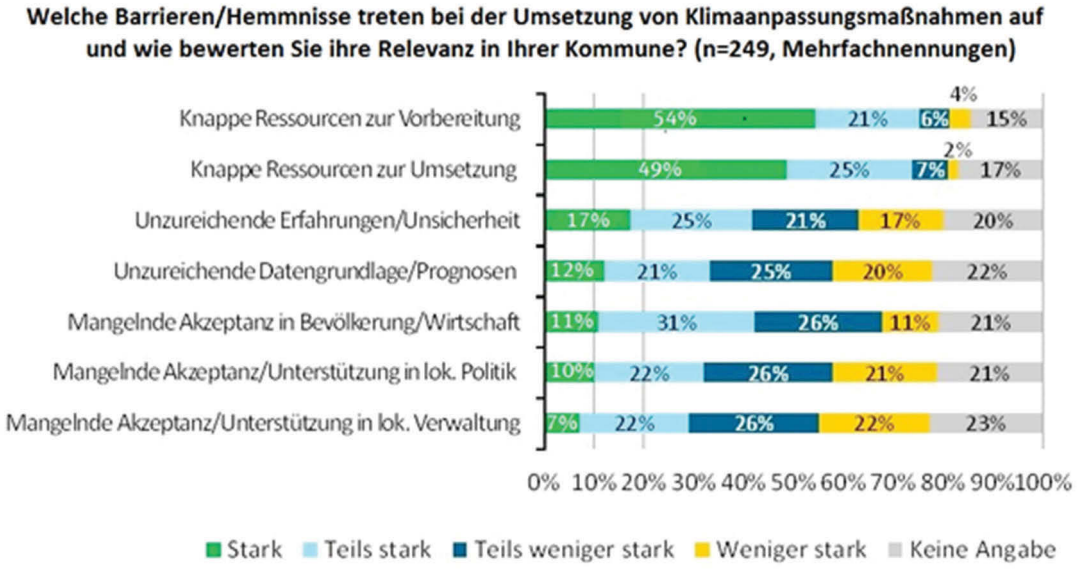


Abb. 6.4-2: *Barrieren und Hemmnisse sowie deren Relevanz bei der Umsetzung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen (UBA 2019d).*

erprobter Formate. Wichtig ist es, Beteiligungsprozesse strukturiert aufzusetzen und dabei Ziele und Wirkungsmöglichkeiten von Teilnehmenden offen zu kommunizieren. Im Nachgang sollten die Wirkungen evaluiert und kommuniziert werden (Lange et al. 2018).

Zusätzliche Steuerungsinstrumente bringen die Umsetzung weiter voran. Ökonomische Instrumente setzen Anreize für gewünschte Maßnahmen anderer Akteure, wie Förderprogramme für Dach- und Fassadenbegrünungen. Darüber hinaus können formelle Instrumente genutzt werden, welche verbindliche Regelungen treffen, zum Beispiel zur Sicherung klimatisch wirksamer Flächen im Rahmen der Bauleitplanung. Ein wichtiger Ansatz liegt zudem bei informellen Instrumenten, wie Selbstverpflichtungen der Kommune und anderer Akteure oder Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit zum Klimawandel (vgl. Mahrenholz et al. 2017).

Auf der Maßnahmenebene besteht eine wichtige Herausforderung für Städte, multifunktionale Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Hier sollten Synergien zwischen Überflutungs- und Hitzevorsorge gezielt erschlossen werden. Nach dem »Schwammstadt-Prinzip« kann durch ein naturnahes Wassermanagement das Regenwasser in den städtischen Böden zurückgehalten und zwischengespeichert werden. Städtische Grünstrukturen lassen sich auf diese Weise kontinuierlicher und nachhaltiger mit Wasser versorgen und kühlen die Stadt (vgl. BBSR 2016).

Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel sollten so entwickelt werden, dass diese wirksam Klimafolgen reduzieren, nachhaltig ausgestaltet sind, flexibel genug sind, um bei Bedarf angepasst werden zu können und robust sind, d.h. bei der Planung verschiedene Klimaszenarien berücksichtigt wurden. Zusätzlich sollten sie für die Städte finanzierbar sein und ein tragbares Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen. Letzteres lässt sich vor allem dann begründen, wenn Maßnahmen einen positiven Mehrfachnutzen aufweisen (Kind et al. 2015).

Wie unterstützen übergeordnete Ebenen die kommunale Anpassung und wie können die Rahmenbedingungen für Städte optimiert werden?

Internationale, europäische und nationale Strategieprozesse zur Klimawandelanpassung können kommunale Prozesse unterstützen. Relevante internationale Prozesse sind Aktivitäten der Vereinten Nationen innerhalb der Klimarahmenkonvention (UNFCCC), des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) sowie der Weltmeteorologie-Organisation (WMO) und beziehen sich auf Monitoring, Klimakommunikation und -dienste. Das Sendai-Rahmenwerk für Katastrophenvorsorge (SFDRR) und die Nachhaltigen Entwicklungsziele (SDGs) ergänzen diese Rahmung. Beide Vereinbarungen unterstreichen die Bedeutung der Klimawandelanpassung, wobei die erstere praktische Risikovorsorge, Prävention und Steuerung, die zweite den Zielekanon für die Transformation der Städte in den Vordergrund rückt. Darüber hinaus beinhalten multi- oder bilaterale Flussgebietsgemeinschaften Maßnahmen zur Klimawandelanpassung, oft im Zusammenhang mit Hochwasservorsorge. Die Alpenkonvention und der 7. Alpenzustandsbericht hebt Klimawandelanpassung insbesondere im Zusammenhang mit Risiko-Steuerung und Naturgefahren als notwendige Aufgabe hervor. Auch in der Trilateralen Wattenmeerzusammenarbeit ist Klimawandelanpassung verankert.

Die EU Strategie zur Klimawandelanpassung trug dazu bei, Wissen auszubauen und – vor allem über die Plattform Climate-ADAPT (*https://climate-adapt.eea.europa.eu/*) – zu verbreiten. Seit 2013 verankerte die EU Kommission Klimawandelanpassung in wichtigen politischen Maßnahmen und Förderprogrammen der EU (wie den Kohäsionsfonds, umgesetzt in operationellen Programmen der Bundesländer). Sie förderte Maßnahmen im Rahmen von LIFE-Projekten sowie dem Konvent der Bürgermeister für Klima und Energie und stärkte Verbindungen zur Katastrophenvorsorge, zur Resilienz der Infrastrukturen und zum Finanzsektor (EU COM 2018). Die Kommission entwickelt die EU Anpassungsstrategie ab 2019 weiter. Internationale Aspekte, wie die Konkretisierung von Anpassungszielen und Berichtspflichten im Rahmen der Governance Verordnung der Energie Union sollen hierbei besondere Aufmerksamkeit erfahren. Als Schwerpunktthemen kristallisieren sich heraus: Klimawandel und Gesundheit, Klimasicherung von Infrastrukturen, nachhaltige Anpassungsfinanzierung und multi-level governance. Im Kommissionsvorschlag für das EU Budget 2021-2027 ist ein 25%-Ziel für Ausgaben im Zusammenhang mit Klimawandel vorgesehen, einschließlich konkreter Ziele für die einzelnen Fonds. Das eröffnet für deutsche Kommunen großen Spielraum für die Förderung von - auch investiven – Projekten (EU COM 2016), der in der Zukunft besser genutzt werden sollte.

National wird der politische Rahmen durch die Deutsche Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (DAS) und seinen Aktionsplan Anpassung gesetzt (Bundesregierung 2015). Die Begleitung und ressortübergreifende Abstimmung der Arbeiten zur DAS erfolgt auf Bundesebene über die Interministerielle Ar-

beitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung (IMAA), die Federführung liegt beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Darüber hinaus richtete die Umweltministerkonferenz (UMK) einen Ständigen Ausschuss zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (StA AFK) ein, der Teil der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Klima, Energie, Mobilität und Nachhaltigkeit (BLAG KliNa) ist. Über den StA AFK sind die Länder an den Arbeiten zur DAS beteiligt. Die DAS erfährt 2020 nach einer Evaluierung ihre Fortschreibung.

Viele Kommunen bestätigen, Impulse durch die DAS hätten Klimawandelanpassung und bestehende Fördermöglichkeiten in der Kommunalpolitik und -verwaltung bekannter gemacht. Doch nur wenige Kommunen nutzen Wissen des Klimavorsorgeportals des Bundes www.klivo.de oder beantragten ein Projekt aus der BMU-Förderung. Sie wünschen sich verbesserte Förderbedingungen und -modalitäten, u.a. eine inhaltliche und förderpolitische Aufweitung des DAS-Förderprogramms und der Kommunalrichtlinie (Breite statt Leuchttürme, thematische Schwerpunkte) und mehr Bezug zur kommunalen Umsetzungsebene »Quartier und Grundstücke«. Der kommunale Unterstützungsbedarf bei Bewusstseinsbildung, Information und Öffentlichkeitsarbeit sollte bei der Weiterentwicklung der DAS berücksichtigt und auch kleine und mittelgroße Kommunen in ländlichen Räumen konkreter adressiert werden. Oftmals stellen die Gesetze des Bundes bereits jetzt einen allgemeinen gesetzlichen Rahmen, der von Kommunen entsprechend ausgeschöpft werden sollte (insbesondere im Planungsrecht, Baurecht, Umweltverträglichkeitsprüfung, Hochwasserschutz). Kommunen wünschen sich konkretere Bundesvorgaben zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen und Unterstützung bei hoheitlichen Aufgaben. Dazu gehört vordringlich die Klärung, ob Aufgaben, die den Klimawandel betreffen, zur Pflichtaufgabe von Kommunen erklärt werden sollten. Darüber hinaus stehen die zugehörigen finanziellen und rechtlichen Aspekte und Rahmenbedingungen (wie Haftung, Maßnahmenfinanzierung, Investitionen und Unterhaltung, Eigenanteile für Förderungen von Kommunen in Haushaltssicherung) zur Klärung und ggf. Regelung an.

Klimawandelanpassung erfährt auch in fachlichen Bund-Länderarbeitsgemeinschaften, wie der Umweltministerkonferenz, zunehmende Relevanz. Ihre Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser entwickelte eine Strategie für ein effektives Starkregenmanagement, welche für die kommunale Starkregenvorsorge wertvoll ist. Diese Strategie empfiehlt Maßnahmen zur Verbesserung der Vorhersage- und Frühwarnsysteme, zur Risikobewertung und -kommunikation, zur Aufklärung der Bevölkerung und zu Aspekten der vorsorgenden Raum- und Flächennutzung sowie der Stadtplanung (LAWA 2018).

Auch in den Bundesländern hat sich Anpassung an den Klimawandel seit 2015 zunehmend etabliert. Sie haben Strategien und Maßnahmenpläne verabschiedet oder aktualisiert. In fast allen Bundesländern gibt es ressortübergreifende Steuerungsgremien, organisatorisch zum Teil gekoppelt mit Fragen des Klimaschutzes. Auch außerhalb der Verwaltung entstehen Netzwerke, zum Beispiel mit Unternehmen oder Repräsentanten der Zivilgesellschaft. Einige Länder haben den rechtlichen Rahmen erweitert: Anpassung an den Klimawandel wurde entweder als Element von Klimaschutzgesetzen oder zusätzlich in Fachgesetzen verankert. Zum Teil ergänzen die Bundesländer die o.a. Förderinstrumente von EU und Bund um bundeslandspezifische Förderungen, die auf die regionale und kommunale Ebene zielen. Die Länder artikulieren den dringenden Bedarf einer zunehmenden finanziellen Förderung von Regionen. Der konkrete Weg dahin sowie die bessere Unterstützung von Kommunen bei der Nutzung von EU-Geldern sind allerdings offen.

Die Forschung sollte künftig die Wirkungen von Extremereignissen auf sozio-technische Infrastrukturen und die Ausprägung urbaner Resilienz stärker in den Blick nehmen (IMA Stadt 2017, Mahrenholz et al. 2019, UBA 2019d): Welche Grundlagen braucht eine vorausschauende kommunale Hitze-/Gesundheits- und Trockenheitsvorsorge? Wie können Interdependenzen und Akteursverhalten modelliert werden, wie sind Pfadabhängigkeiten zu vermeiden sowie Fragen der (evtl. nicht vorhandenen) Wirtschaftlichkeit einzubeziehen? Wie kann Akzeptanz für die Gestaltung langfristig angelegter Infrastrukturen angesichts oft kurzfristiger (politischer) Strategien geschaffen werden? Wie erfolgt die kritische Evaluierung bisheriger PPP-Modelle auch im Hinblick auf die langfristige Kostenentwicklung und Wirtschaftlichkeit für Kommunen? Wodurch können rein ökonomisch getriebene Entscheidungen überwunden und Fragen der (Umwelt) gerechtigkeit stärker in den Blick gerückt werden? Wie können Models of Change und gute Praxis-Beispiele helfen, die Nachhaltigkeitstransformation zu beschleunigen und die relevanten Stakeholder zu aktivieren? Welche Rolle spielt die Fähigkeit zu komplexem »Systemdenken« für die Gestaltung urbaner Resilienz? Was sind konsistente Zielsysteme für diese Resilienz und wie sind die Betroffenen in diese Entscheidungen einzubeziehen? Weiterhin sollte der gesetzliche Rahmen sowie finanzielle und institutionelle Anreize auf inhärente Barrieren für Innovationen geprüft werden.

In diesem Kontext sollte eine verbesserte Umsetzung von Forschungserkenntnissen fokussieren auf: die verstärkte transdisziplinäre Einbeziehung von bisher nicht in Forschungsprojekten beteiligten Kommunen, um dort Kompetenzen aufzubauen; Zulassen kreativer Experimente in inter- und transdisziplinären Projekten mit Stadtplanern, Bildungsexperten, Künstlern, IT-Spezialisten, Soziologen, Ökonomen, Ökologen, Zukunftsforschern, Verwaltungsmitarbeitern und auch deren Scheitern mit entsprechenden »Abfeder-Mechanismen« vor allem für Kommunen einkalkulieren, das – zwecks »Lerneffekt« – öffentlich gemacht wird. Innovative Prozesse sollten vor allem im Hinblick auf den rechtlichen Rahmen in Reallaboren getestet und mit Wirkungsabschätzung verbunden werden. Demonstrationsvorhaben/Reallabore (BMWi) zur Städtebauförderung (BMI) und daraus erwachsende Handlungsempfehlungen sollten die Umsetzung in Rechtsinstrumente (BMU) vorbereiten. Dabei sollte der Bund jeweils dem »Reifegrad« von Lösungen entsprechende Hilfen und Förderungen anbieten, beispielsweise Informationen über existierende Netzwerke, Allianzen und Austausch-Plattformen (wie dem KlimAdapt-Netzwerk) und/oder den Einsatz von »Umsetzungs-Agenten« (wie Klimaschutz-Manager). In Infrastrukturdesign und -planung sollten über Sektorengrenzen hinausgehende Codes die Normungspraxis gestalten.

Fazit

Unterstützende Rahmenbedingungen für eine kommunale Klimawandelanpassung werden durch EU, Bund und Länder bereitgestellt. Kommunen sollten ihre Maßnahmen entsprechend ausrichten, die vorhandenen Rahmenbedingungen nutzen und künftig auch aktiv beeinflussen. Denn es besteht noch Verbesserungsbedarf dieser Rahmenbedingungen. Dies trifft insbesondere auf Förder- und Rechtsinstrumente zu. Des Weiteren gibt es großen Forschungs- und Erprobungsbedarf, wie sich die klimaresiliente Stadt entwickeln lässt und wie eine Transformation dahin gestaltet werden kann.

Referenzen

BUNDESREGIERUNG (2015) Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Deutsche Bundesregierung, Berlin. *https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_fortschrittsbericht_bf.pdf, 275 S.* (Zugriff am 24.10.2019).

BBSR (2016): Querauswertung zentraler Verbundvorhaben des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel mit Fokus Stadt- und Regionalentwicklung. BBSR-Online-Publikation 04/2016. 209 S.

BUTH M., W. KAHLENBORN, J. SAVELSBERG et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. UBA Climate Change 24/2015: 666-667.

DWD (2019): Deutschlandwetter im Juli 2019. Hitzewelle in Deutschland erreicht neue Dimensionen. Pressemitteilung v. 30.07.2019. *https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2019/20190730_deutschlandwetter_juli.pdf?__blob=publicationFile&v=2* (Zugriff am 24.10.2019).

EU COM (2016): Climate Change and Major Projects. Outline of the climate change related requirements and guidance for major projects in the 2014-2020 programming period. *https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/major_projects_en.pdf* (Zugriff am 31.07.2019).

EU COM (2018): Bericht der Kommission an das EU Parlament und den Rat über die Umsetzung der EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. COM(2018) 738 final: 6-7. *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0738&from=EN* (Zugriff am 31.07.2019).

FORZIERI G., A. BIANCHI, E. BATISTA, F. SILVA et al. (2018): Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe, Global Environmental Change 48: 97-107.

IMA STADT (2017): Bericht des interministeriellen Arbeitskreises »Nachhaltige Stadtentwicklung in nationaler und internationaler Perspektive« (IMA Stadt) 2017. *https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nachhaltige_Entwicklung/ima_stadt_bericht_bf.pdf* (Zugriff am 30.07.2019).

KIND C., A. VETTER & R. WRONSKI (2015): Development and application of good practice criteria for evaluating adaptation measures. In: Leal W (Hrsg): Handbook of climate change adaptation. Springer, Berlin, S 297-318.

LANGE A., A. VETTER & A. EBERT (2018): Criteria and Factors for Successful Stakeholder Participation, GoApply Report. *https://www.alpine-space.eu/projects/goapply/results/results_revised/goapply_d.t3.1.1_wp3_success_criteria_review_uba-de_nov-2018.pdf (Zugriff am 02.09.2019).*

LAWA (2018): Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. Erfurt. *https://www.lawa.de/documents/lawa-starkregen_1552292818.pdf* (Zugriff am 30.07.2019).

MAHRENHOLZ P., G. J. SCHENK & A. HUCK (2019): Challenges of extreme events for resilient infrastructures. In: Extreme Events – Building climate resilient societies. Herrenhausen Conference. 9-11 October 2019. *https://www.volkswagenstiftung.de/en/events/calendar-of-events/herrenhausen-conferences/extreme-events-building-climate-resilient-societies* (Zugriff am 24.10.2019).

MAHRENHOLZ P., G. J. SCHENK & J. HUCK (2017): Optionen zur Weiterentwicklung von Anpassungsstrategien. In: Guy Brasseur, Daniela Jacob, Susanne Schuck-Zöller (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland – Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven: 335-344.

PAVLIK D., M. HEIDENREICH & R. WOLKE et al. (2016): KLENOS - Einfluss einer Änderung der Energiepolitik und des Klimas auf die Luftqualität sowie Konsequenzen für die Einhaltung von Immissionsgrenzwerten und Prüfung weitergehender emissionsmindernder Maßnahmen. UBA Texte 84/2016:189.

RKI (2019): Schätzung der Zahl hitzebedingter Sterbefälle und Betrachtung der Exzess- Mortalität; Berlin und Hessen, Sommer 2018. Epidemiologisches Bulletin (23) 6. Juni 2019: 193-206.

UBA (2016): Kommunen befähigen, die Herausforderungen der Anpassung an den Klimawandel systematisch anzugehen (KoBe), UBA Climate Change 20/2016. 106 S.

UBA (2018): Transformative Umweltpolitik. Nachhaltige Entwicklung konsequent fördern und gestalten. *https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/transformative_umweltpolitik_nachhaltige_entwicklung_konsequent_foerdern_und_gestalten_bf.pdf* (Zugriff am 30.09.2019).

UBA (2019a): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Oktober 2019.

UBA (2019b): Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und ökonomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen. UBA Climate Change, in Veröffentlichung.

UBA (2019c): Daten zur Umwelt, Jahresmittelwerte der Ozonkonzentration 1990 bis 2018. *https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/ozon-belastung#textpart-3* (Zugriff am 31.07.2019).

UBA (2019d): Umfrage Wirkung der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) für die Kommunen. UBA Climate Change 01/2019. 116 S.

UFZ (2019): Dürremonitor. *https://www.ufz.de/index.php?de=37937* (Zugriff am 31.07.2019).

UNIVERSITÄT BIELEFELD (2014): KommAKlima - Kommunale Strukturen, Prozesse und Instrumente zur Anpassung an den Klimawandel in den Bereichen Planen, Umwelt und Gesundheit, Ist Klimaanpassung im Öffentlichen Gesundheitsdienst kommunaler Praxis angekommen? *https://www.uni-bielefeld.de/gesundhw/ag7/downloads/kommaklima2.pdf* (Zugriff am 02.09.2019).

Kontakt:

Dipl. Meteor. Petra Mahrenholz
Dipl. Ing. Andreas Vetter
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
petra.mahrenholz@uba.de

Mahrenholz P. & A. Vetter (2019): Anpassung an den Klimawandel in deutschen Städten: Herausforderungen und Politikinstrumente. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. 221-226. www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.32

6.5 Maßnahmen zur Hitzestress-Reduzierung anhand Verdunstungsabkühlung

Bernd Kirschbaum, Heiko Sieker, Ruth Steyer, Björn Büter, Dominika Lessmann, Robert von Tils, Carlo Becker & Sven Hübner

Großflächig versiegelte und hoch verdichtete Stadtstrukturen mit einer geringen Begrünung lassen aufgrund des Klimawandels und zunehmend heiße Tage sogenannte Hitze-Inseln in der Stadt entstehen (Urban-Heat-Island Effekt). Wasser, das verdunstet, kühlt das Mikroklima. Daher sind Maßnahmen günstig, die Regenwasser nicht abführen, sondern längere Zeit speichern, damit es in Hitzeperioden verdunsten kann. Feuchte Böden, Feuchtvegetation, bewässerte Fassaden und gut mit Wasser versorgte Bäume haben die höchsten Verdunstungswerte und kühlen damit am besten. Intelligente Techniken und Verfahren für eine dezentrale Regenwasserbewirtschaftung können im Zusammenspiel mit anderen Maßnahmen einen Beitrag für ein gesundes Stadtklima und die Hitzevorsoge leisten. Sie tragen auch zu einem naturnahen Wasserhaushalt bei und dienen der Überflutungsvorsorge, sind bislang allerdings keine gängige Praxis.

***Measures for heat stress reduction by evaporative cooling:** Due to climate change and increasingly hot days, so-called urban heat islands are being created in the city due to large-scale sealed and highly dense urban structures with poor vegetation cover (urban-heat-island effect). Water which evaporates cools the microclimate. Measures that do not drain rainwater away but store it for a longer period of time so that it can evaporate during heat periods are therefore favourable. Humid soils, wet vegetation, irrigated facades and trees that are well supplied with water have the highest evaporation values and therefore cool best. Intelligent technologies and processes for decentralised rainwater management can, in combination with other measures, contribute to a healthy urban climate and heat prediction. They also contribute to a near-natural water balance and serve to prevent flooding, but are not yet common practice.*

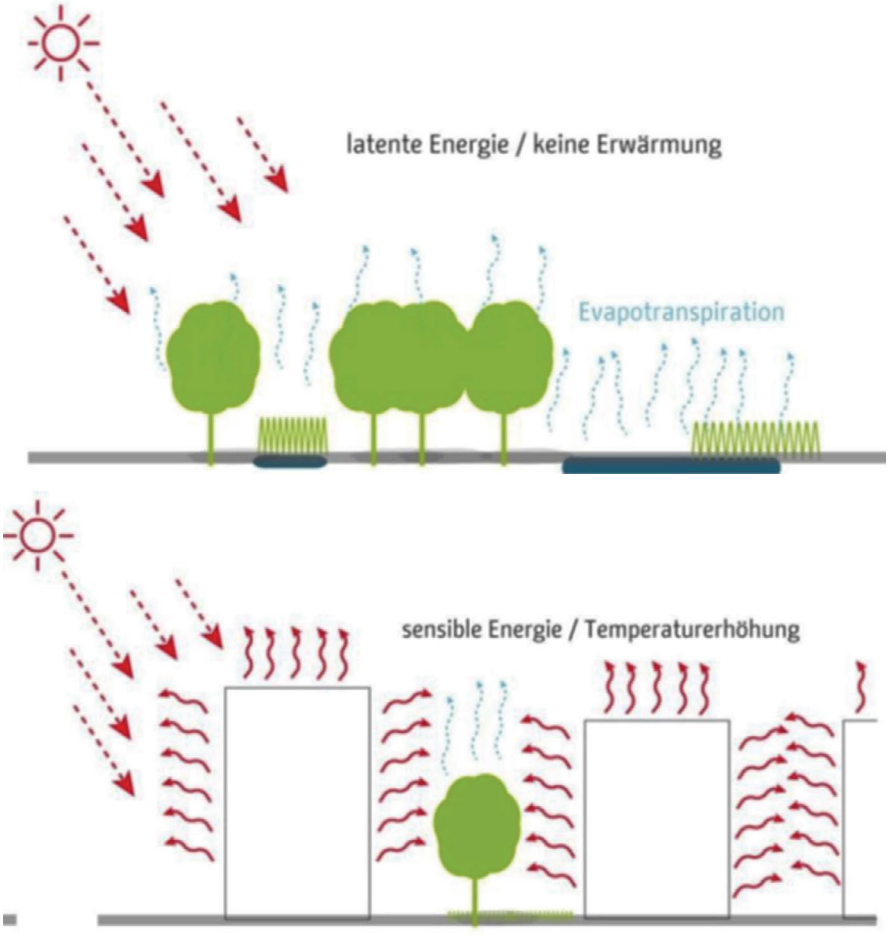


***Abb. 6.5-1:** Verdunstung in einem natürlichen (oben) und in einem urbanem Gebiet (unten) (© SenStadtUm Berlin/BGMR 2016).*

Der Klimawandel ist für Städte durch häufigere Starkregenereignisse, Hitzewellen und Trockenperioden eine große Herausforderung. Die zeitgleich zunehmende Urbanisierung und der damit verbundene Anstieg der versiegelten Flächen beeinflusst den Wasserhaushalt und das Abflussregime in den Städten zusätzlich negativ (Deister et al. 2016). Vegetationsflächen, die gut mit Wasser versorgt sind und damit durch Verdunstung kühlen, sind in der Stadt nur in begrenztem Umfang vorhanden. Eine Folge ist: die Stadt heizt sich schneller auf als die offene Landschaft; sie speichert Wärme und kühlt in der Nacht weniger schnell ab. Wärme- beziehungsweise Hitzeinseln sind ein typisches Merkmal des Stadtklimas. Klimaprojektionen zeigen, dass mit einem weiteren Anstieg der mittleren jährlichen Lufttemperatur in Deutschland bis zum Ende des Jahrhunderts gerechnet werden muss. Aber auch die Anzahl an heißen Tagen mit einer maximalen Lufttemperatur von über 30 °C ist seit den 1950er Jahren von 3 Tagen im Mittel über Deutschland auf heute 9 Tage im Jahr angestiegen. Die Kühlung von Gebäuden mittels Strom, z.B. über Kompressionskälte ist Stand der Technik. Allerdings werden die Betriebskosten und die Umweltrelevanz der Kältetechnik oft unterschätzt. Kälte- und Klimaanlagen verbrauchen allein 14% der Elektroenergie in Deutschland (Richter et al. 2014). Daher sind neue Ideen und strategische Ansätze zur Integration von Wasserwirtschaft und Stadtplanung erforderlich. Die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung kann einen wichtigen Beitrag zu einer intelligenten dezentralen Regenwasserbewirtschaftung für die Verbesserung der Wasser- und Energiebilanz sowie zur Minderung negativer Hitzeinseleffekte in den Städten leisten.

Maßnahmen zur Hitzestress-Reduzierung anhand Verdunstungsabkühlung

Grundsätzlich gilt, dass jede Art von Bepflanzung, ob Parks, Straßenbäume oder grüne Balkone, aber auch offene Wasserflächen sowie nicht versiegelter Boden einen Teil zur Verdunstungskühlung beitragen. Durch gezielte Verfahren und Techniken kann dieser Effekt noch verstärkt werden. Mögliche Maßnahmen sind die Kühlung und Verschattung von Gebäuden und öffentlichen Räumen durch Frischluftschneisen, Flächenentsiegelung und lokale grüne Infrastrukturen, wie Straßenbäume, Fassadenbegrünungen und Dachbegrünungen. Solche naturnahen Elemente stärken die dezentrale Regenwasserversickerung und helfen somit Bodenfeuchte und Grundwasserneubildung in urbanen Räumen zu erhöhen. Dies verbessert auch die Pflanzenversorgung in Trockenphasen. Um diese zu gewährleisten ist eine Kombination mit Maßnahmen zur temporären Regenwasserspeicherung notwendig. Konzepte wie das Schwammstadtprinzip, in welchem das Niederschlagswasser am Ort der Entstehung zwischengespeichert und in die »grünen Elemente« eingeleitet werden soll, berücksichtigen diesen Sachverhalt.

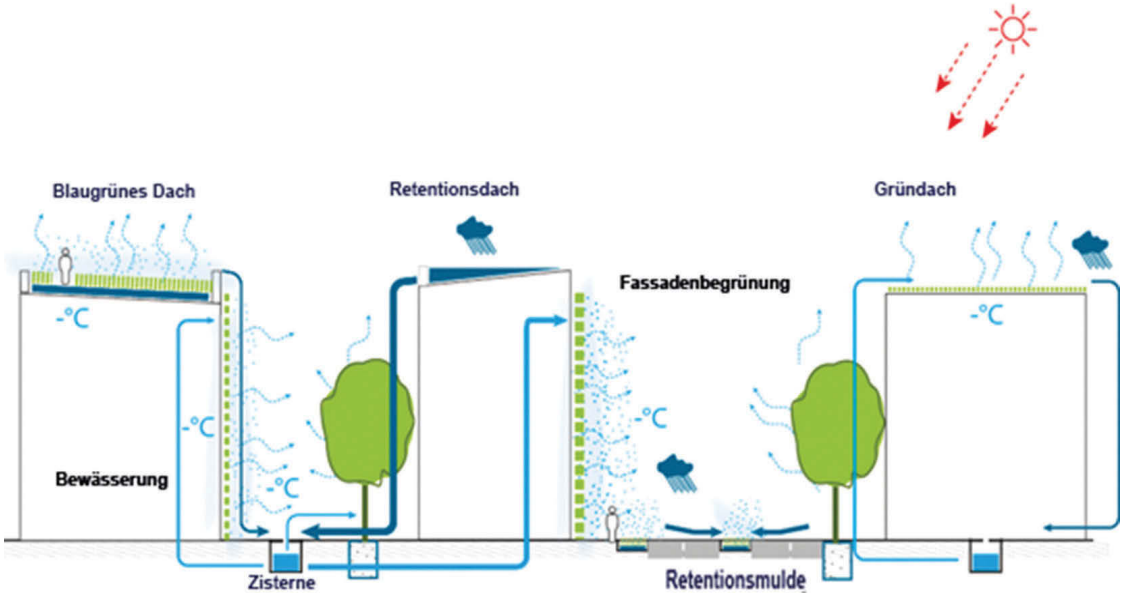


Abb. 6.5-2: *Das Schwammstadtprinzip (© SenStadtUm Berlin/bgmr 2016).*

Bodenkühlleistung, Grünflächen und Flächenentsiegelungen

Städtische Hitzeinseln (*urban heat islands*) sind bereits ohne Klimawandel sehr ausgeprägt und besonders in den Großstädten und dicht bebauten Stadtregionen deutlich spürbar. Temperaturunterschiede zwischen urbanen und ruralen Gebieten von 3-4 °C, insbesondere in heißen Sommernächten, sind keine Seltenheit. Das Wachstum der Städte und der Klimawandel verschärfen diesen Effekt noch. Im urbanen Raum besteht oftmals ein ungenutztes Potential zur Nutzung und Optimierung der Bodenkühlleistung (LANUV NRW 2015). Jedoch nur, wenn der Bodenaufbau, die Wasserversorgung und die Vegetation optimiert werden. Auf trockenen Oberflächen wird dagegen die von der Sonne zugeführte Energie in fühlbare Wärme (sensible Energie) umgewandelt (*Abb. 6.5-1_unten*) - eine Grünfläche in einem Stadtpark ohne ausreichende Wasserversorgung heizt sich fast genauso auf wie eine Asphaltfläche. Durch bodenverbessernde Maßnahmen, wie zum Beispiel die Erhöhung der Durchwurzelungstiefe und des Porenraums und durch nachhaltige Bewässerungslösungen zur Auffüllung des Bodenwasserspeichers in Trockenzeiten kann die Verdunstungs- und Kühlleistung von urbanen Böden deutlich erhöht werden.

Dem Erhalt und der Vergrößerung der städtischen Grünflächen kommt eine wesentliche Bedeutung für die nachhaltige Stadtentwicklung zu. Durch die Wahl einer standortgerechten Bepflanzung mit hoher Verdunstungsleistung und einer gezielten Wasserversorgung von Grünflächen in Hitzeperioden lassen sich die Verdunstungsleistung und damit der Kühleffekt steigern. Allerdings stellt die potentielle Schadstoffanreicherung des abfließenden Niederschlagswassers von den verschiedenen Stadtoberflächen oftmals ein Hemmnis für die Nutzung des Wassers dar.

Schwammstadtprinzip

Die Idee der Speicherung und Rückhaltung von Regenwasser in Städten und der dadurch bedingten Verzögerung und Verminderung des Abflusses wird auch als Konzept der Schwammstadt (*Sponge City*) bezeichnet. Voraussetzung für Maßnahmen zur Verdunstungskühlung ist, dass entsprechend große Retentionsräume für den Rückhalt von Regenwasser bereitgestellt werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass genügend Wasser für die Verdunstung in trockenen Zeiträumen zur Verfügung steht. Für Dürreperioden können darüber hinaus Bewässerungsmöglichkeiten etabliert werden. Diese müssen jedoch effizient und wassersparend gestaltet sein. Bei der Verwendung von Brauchwasser (z.B. Regenwasser, aufbereitetes Grauwasser (gering verschmutztes Abwasser)) zur Bewässerung von urbanen Grünflächen sind qualitative und hygienische Fragen zu berücksichtigen (DWA 2019). Die Retentionsräume haben zusätzlich den Vorteil, dass gleichzeitig Kanalisationssysteme und Gewässer hydraulisch entlastet werden und eine Risikominimierung bei Stark- und Extremregenereignissen erreicht werden kann.

Teiche sind dauerhaft mit Wasser gefüllt und weisen eine hohe Verdunstungsleistung auf. Eine Weiterentwicklung hinsichtlich der Verdunstungsleistung von Teichen stellen Verdunstungsbeete (wassergesättigte Vegetationsbeete) dar, die auch als Urban Wetlands bezeichnet werden. Durch den Bewuchs einer Wasserfläche, ist es möglich deren Kühlleistung erheblich zu steigern, vorausgesetzt es ist eine ausreichende Wasserversorgung gegeben. Es bietet sich die Koppelung mit Regenwasserspeichern (Zisternen) an, um einerseits den Regenwasserabfluss zu reduzieren und andererseits Trinkwasser zur Bewässerung zu substituieren. *Abb. 6.5-2* zeigt das Schwammstadtprinzip als systematisches Zusammenwirken von Regenwasserbewirtschaftung und Oberflächengestaltung.

Begrünte Dächer und Fassaden

Um möglichst viel Fläche für die Verdunstung zu aktivieren, gilt es, auch die Gebäudehüllen zu integrieren und Grünflächen mit den zusätzlichen Funktionen von Speicherung und Verdunstung zu belegen (SenStadtUm Berlin/bgmr 2016).

Bei der Begrünung von Dachflächen wird zwischen extensiven und intensiven Dachbegrünungen unterschieden. Extensive Dachbegrünungen sind einschichtig mit einer Substratmächtigkeit von weniger als 15 cm aufgebaut und zumeist mit niedrig wachsenden Gräsern, Sedumarten oder Sukkulenten bepflanzt, die trockenverträglich und pflegeleicht sind. Sie eignen sich aufgrund der geringen Auflast auch zum nachträglichen Aufbau auf bislang unbegrünten Flachdächern. Intensiv begrünte Dächer (mehrschichtig, Substratstärke >15 cm) können bis zur kompletten Gartenlandschaft auf dem Dach reichen. Besonders Tiefgaragen eignen sich für intensive Begrünung, da hier aus statischen Gründen dickere Schichtaufbauten möglich sind. Gründächer kühlen in Hitzeperioden nur, wenn sie ausreichend mit Wasser versorgt sind, sei es durch Bewässerung oder indem sie selbst Wasser speichern. Eine Dachbegrünung, die bei Hitze über geeignete Systeme bewässert wird, ist im Sinne der hitzeangepassten Stadt ausgesprochen wirkungsvoll (SenStadtUm Ber-

LIN/BGMR 2016). Für beide Begrünungsarten gibt es technische Retentionssysteme, die den Wirkungsgrad der Regenwasserrückhaltung verbessern und gleichzeitig in Trockenphasen für eine längere Wasserversorgung der Pflanzen sorgen können. Empfehlungen für Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen sind in den Dachbegrünungsrichtlinien der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V. (FLL 2018) zu finden.

Bei der Begrünung von Fassaden wird erstens zwischen systemgebundenen und bodengebundenen Systemen und zweitens zwischen dem Direktbewuchs an der Hauswand und dem Bewuchs an einem vorgesetzten Klettergerüst differenziert. Während bodengebundene Systeme zumindest zum Teil mit örtlichen Niederschlägen versorgt werden können, benötigen systemgebundene Fassadenbegrünungen meist eine zusätzliche Bewässerung. Die Kühlwirkung der Fassadenbegrünung beruht neben der Verdunstungskühlung auch auf der gleichzeitigen Verschattung der Hauswand.

Straßenbäume und Baum-Rigolen

Der Wert unserer Stadt- und Straßenbäume ist unschätzbar. Sie regulieren zum Beispiel das Mikroklima, spenden Schatten, filtern Emissionen aus Luft und Boden, werten das Stadtbild auf und sind Lebensraum stadttypischer Vogel- und Insektenarten. Stadtbäume wachsen meist unter schlechteren Standortbedingungen als Bäume in der Natur und leiden unter Verdichtung, Schadstoffen oder Streusalz, so dass die Folgen des Klimawandels – wie Trockenheit – sie zusätzlich belasten. Gesunde Straßenbäume sind jedoch für die Kühlung der Städte durch deren kombinierte Wirkung aus Verdunstungsleistung und Schattenwurf von besonderer Bedeutung, da sie der Aufheizung entgegenwirken.

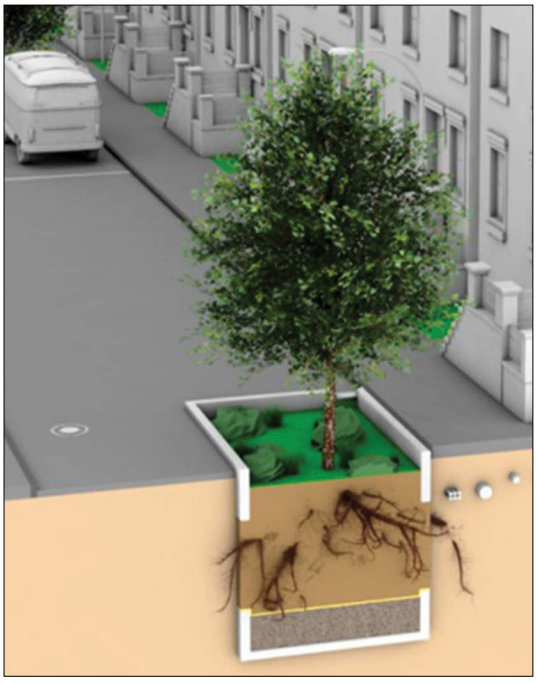


Abb. 6.5-3: *Prinzipquerschnitt einer Baum-Rigole (© Sieker 2017).*

Die Baum-Rigole besteht aus einem Baum in einer Versickerungsfläche, die temporär eingestaut werden kann und einer unterirdisch angelegten Rigole. Teile dieser Rigole werden als Wurzelraum für einen Baum genutzt (vgl. *Abb. 6.5-3*). Im Gegensatz zum herkömmlichen Straßenbaum besitzt die Baum-Rigole ein optimiertes Wasserdargebot. Die Zuleitung von Niederschlagswasser in die Baum-Rigole kann je nach den Gefälleverhältnissen flächig über die sog. Baumscheibe oder punktuell mit gefassten Abflüssen erfolgen. Durch das Prinzip der Baum-Rigole wird Oberflächenabfluss reduziert, bei gleichzeitiger Erhöhung von Verdunstung und Versickerung. Neben den Verdunstungseffekten führt auch die Verschattung der umgebenden versiegelten Flächen zu einer Minderung des Heat-Island-Effects.

Potential

In einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA) wurden in drei Fallstudien die Wirkungen von Maßnahmen zur Regenwasserverdunstung auf ausgewählte thermische bzw. human-biometeorologische Parameter mit Hilfe von numerischen Modellierungen beispielhaft quantifiziert (SIEKER 2019). Dabei wurden auf Gebäudeebene die Innenraumtemperaturen sowie der (potentielle) Energieverbrauch zur Gebäudekühlung betrachtet, während auf gesamtstädtischer Ebene eher humanbioklimatische Indizes (»gefühlte Temperaturen«) für den Aufenthaltsbereich der Stadtbevölkerung im (halb-)öffentlichen Stadtraum im Zentrum der Analyse standen. Neben der Verdunstung spielt auch die gleichzeitig auftretende Verschattung eine Rolle. Zentrale Ergebnisse sind:

- Auf Gebäudeebene lässt sich eine Energieeinsparung zur Kühlung der Innenräume im Bereich von 10% (Dachbegrünung) bis zu 50% (Beschattung mit Bäumen) erreichen. Fassadenbegrünungen sind in der Summe effektiver als Dachbegrünungen, weil sie eine größere Fläche einnehmen und auf allen Etagen wirksam sind. Ihre Verdunstungskühlleistung lässt sich durch die Bewässerung steigern. Die Wirkung der Maßnahmen ist im Vergleich zum unbegrünten Basisgebäude in den von der Hitze

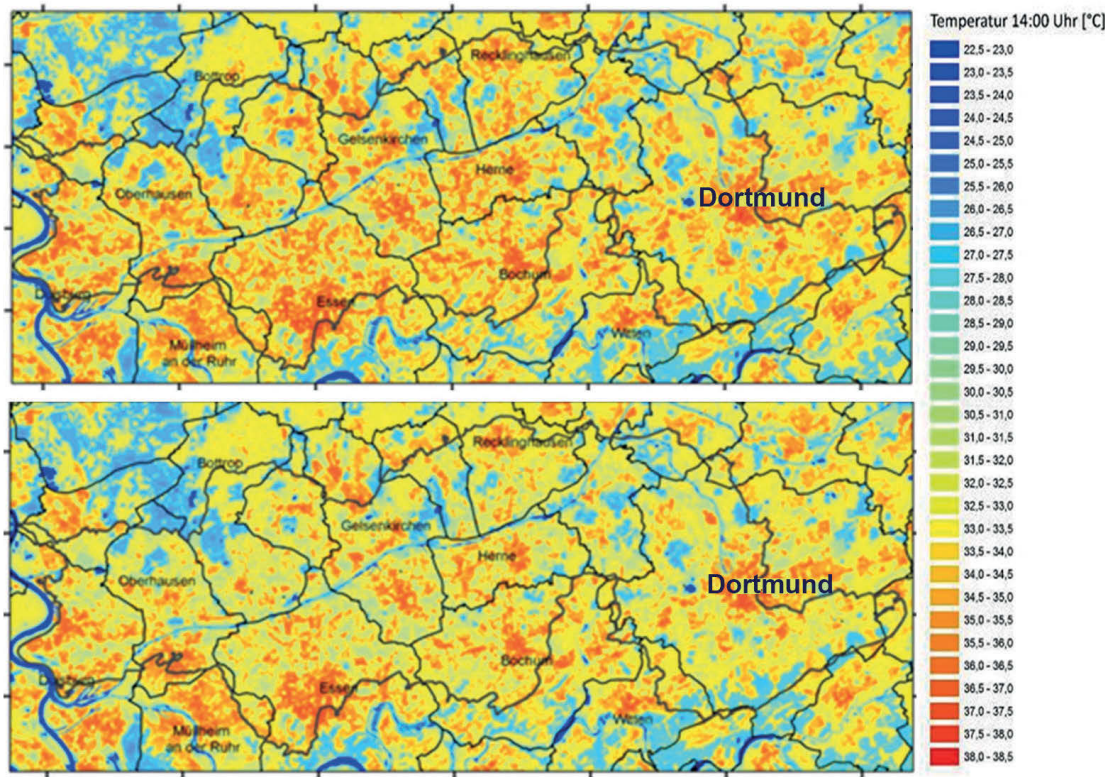


Abb. 6.5-4: *Ergebnis der Modellierung für die bodennahe Lufttemperatur um 14:00 Uhr im Untersuchungsgebiet für den Ist-Zustand (oben) und mit Verdunstungskühlungs-Maßnahmen (unten) - (aus Sieker 2015 geändert).*

besonders betroffenen Räumen am stärksten. Dort wird die Anzahl an Tagen mit mittleren täglichen Innenraumtemperaturen von über 25 °C aufgrund der Fassadenbegrünung um etwa die Hälfte gesenkt. Mit Hilfe von Bäumen wird die Anzahl dieser Tage um etwa ein Drittel gesenkt. Die Wirkung der Bäume beruht hier hauptsächlich auf ihrer Verschattung und weniger auf ihrer Verdunstungskühlung.

- Auf Quartiersebene wurde das Außenklima untersucht. Hier zeigen ebenfalls die Bäume und die Fassadenbegrünungen die stärkste Wirkung. Im Gegensatz zur Dachbegrünung oder Teilentsiegelung kann durch diese Maßnahmen der ausschließlich auf die Lufttemperatur bezogene Hitzestress am Tage über einen längeren Zeitraum nachhaltig reduziert werden (- 16%). Auch nachts sind die Effekte der Fassadenbegrünung zu spüren, wobei auch die Dachbegrünung einen kleineren Anteil dazu liefert. Es wird eine um 17% geringere Anzahl an Tropennächten erreicht.
- Auf gesamtstädtischer beziehungsweise stadtregionaler Ebene lässt sich die (nach-)mittägliche bodennahe Lufttemperatur während heißer Sommertage mit Hilfe von Regenwasserverdunstung im Mittel über 12 Städte der modellierten Emscher-Region um 0,9 Kelvin (K) abkühlen. Je nach Stadtstruktur ergeben sich Abkühlungspotentiale zwischen 0,5 K und 1,3 K (siehe *Abb. 6.5-4*).

Handlungsempfehlungen

Mit Hilfe der Verdunstungskühlung wird das Wasser nicht mehr abgeführt, sondern soll im Einzugsgebiet verbleiben. Das setzt ein neues Denken und einen Paradigmenwechsel voraus. Unabhängig davon ob diese Paradigmen nun »Schwammstadt«, »die grüne Stadt« oder »blau-grüne Infrastrukturen« heißen: Die Verdunstungskühlung ist – als explizite Zielgröße oder willkommener Nebeneffekt – ein zentrales Element einer Gesamtstrategie hin zu einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung. Aus den Erkenntnissen des UBA-Forschungsprojektes wurden deshalb Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Verdunstungskühlung in Städten abgeleitet.

Von grundlegender Bedeutung ist die Sensibilisierung und Beteiligung der Verantwortlichen in der Politik, der Planenden und nicht zuletzt der Betroffenen

um das Thema in der Planung und Praxis bekannt zu machen und für Akzeptanz zu werben.

Um gezielt Maßnahmen zur Verdunstungskühlung verorten zu können, ist es wichtig, Teilräume zu identifizieren, die eine starke Hitzebelastung und Potentiale zur Verbesserung der Wasser- und Energiebilanz aufweisen. In dicht bebauten, und damit besonders hitzeanfälligen Stadtstrukturen, liegen die Potentiale für die Verdunstungskühlung vor allem in der Regenwasserretention und Begrünung auf der Gebäudeoberfläche. Wichtig ist dabei, das Ziel der „Verdunstungsstadt" mit anderen Zielen der Stadtentwicklung, wie der wassersensiblen, klimaangepassten oder grünen, biodiversen Stadt, zu bündeln und Synergien zu nutzen.

Nicht zuletzt sollte die Verdunstungskühlung auch neu bzw. zielführend in die gesetzlichen Regelungen und Regelwerke der Wasserwirtschaft und der Stadtentwicklung aufgenommen werden. Dies schließt auch Anreize durch Förderung oder Kosteneinsparungen, etwa im Rahmen von Programmen oder Gebührenordnungen, ein. Die Verankerung in den technischen Regelwerken ist notwendig, um die Verdunstungskühlung in Städten in die Praxis zu überführen und hilfreich, um Grundsatzdiskussionen zu vermeiden. Innerhalb des Wasserrechts empfehlen die Autoren der UBA-Studie eine bundesweite Rechtsverordnung für die Regenwasserbewirtschaftung. Weiter sollten im Wasserhaushaltsgesetz vor allem Maßnahmen gegen Starkregen und Hitze, wie z.B. der Erhalt des natürlichen Wasserhaushalts bei Neuplanungen, gesetzlich verankert werden. Innerhalb des Bau- und Planungsrechts lassen sich aufgrund der im Baugesetzbuch enthaltenen Festsetzungsmöglichkeiten von Grünflächen, Wasserflächen und Flächen für Bepflanzungen viele dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmethoden, die auch zur Verdunstungskühlung beitragen, verbindlich über einen Bebauungsplan absichern. Als ein neuer grundstücksbezogener Zielwert wird die rechtliche Verankerung des Grünflächenfaktors in der Baunutzungsverordnung empfohlen. Mit ihm sollte für die unterschiedlichen Baugebiete der Mindestanteil zu begrünender Flächen festlegt werden.

Literatur

BBSR (2018): BBSR-Portal Klimastadtraum - Toolbox Klimaanpassung im Stadtumbau. *https://www.klimastadtraum.de/DE/Arbeitshilfen/ToolboxKLimaanpassung%20im%20Stadtumbau/toolbox_node.html.*

DEISTER L., F. BRENNE, A. STOKMAN, M. HENRICHS, M. JESKULKE, H. HOPPE & M. UHL (2016): Wassersensible Stadt- und Freiraumplanung – Handlungsstrategien und Maßnahmenkonzepte zur Anpassung an Klimatrends und Extremwetter; Universität Stuttgart - Institut für Landschaftsplanung und Ökologie.

DWA (2019): Non-Potable Water Reuse – Development, Technologies and International Framework for Agricultural, Urban and Industrial Uses, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef.

FLL (2018): Dachbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltungen von Dachbegrünungen, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V.

HESSEL J.-D., M. ROOS, S. BUCHHOLZ, M. KOSSMANN, T. GASSDORF, K. HOFFMANN & P. TANNER (2017): Urbane Räume nachhaltig gestalten - Entscheidungshilfe für eine klimagerechte Stadtentwicklung, DWD.

INKAS (Informationsportal Klimaanpassung in Städten); *www.dwd.de/DE/leistungen/inkas/inkasstart.html.*

LANUV NRW (2015): Kühlleistung von Böden – Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW; LANUV-Arbeitsblatt 29.

MATZINGER A., M. RIECHEL, C. REMY, H. SCHWARZMÜLLER, P. ROUAULT, M. SCHMIDT, M. OFFERMANN, C. STREHL, D. NICKEL, H. SIEKER, M. PALLASCH, M. KÖHLER, D. KAISER, C. MÖLLER, B. BÜTER, D. LESSMANN, R., VON TILS, I. SÄUMEL, L. PILLE, A. WINKLER, H. BARTEL, S. HEISE, B. HEINZMANN, K. JOSWIG, B. REHFELD-KLEIN & B. REICHMANN (2017): Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung - Ergebnisse des Projektes KURAS, Berlin.

RICHTER M., M. SAFARIK & C. HEINRICH (2014): Klimafreundliche Gebäudeklimatisierung – Ein Ratgeber für Architekten, Bauherren und Planer, Umweltbundesamt, Dessau.

SENSTADTUM BERLIN/BGMR (2016): Stadtentwicklungsplan Klima KONKRET. Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt/bgmr Landschaftsarchitekten GmbH, Berlin.

SIEKER H., R. STEYER, B. BÜTER, D. LESSMANN, R. VON TILS, C. BECKER & C. HÜBNER (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten, Texte 111/2019, Umweltbundesamt, Dessau.

Kontakt:

Bernd Kirschbaum
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
bernd.kirschbaum@uba.de

Prof. Dr. Heiko Sieker
Ruth Steyer
Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH, Hoppegarten

Dr. Björn Büter
Dominika Leßmann
Robert von Tils
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

Dr. Carlo Becker
Sven Hübner
bgmr Landschaftsarchitekten GmbH, Berlin

Kirschbaum B., H. Sieker, R Steyer, B. Büter, D. Lessmann, R. von Tils, C. Becker & S. Hübner (2019): Maßnahmen zur Hitzestress-Reduzierung anhand Verdunstungsabkühlung. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 227-232. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.33.

6.6 Paradigmenwechsel im Umgang mit dem Regenwasser in wachsenden Städten

Christian Günner, Franziska Meinzinger & Andreas Kuchenbecker

Die bestehenden Infrastrukturen von Städten und Kommunen unterliegen einem permanenten Entwicklungs- und Veränderungsprozess. Treiber dafür sind in Hamburg das Wachstum der Stadt, die ungebremste Versiegelung der Oberflächen und der Klimawandel. Während in der Vergangenheit die Ableitung von und der Schutz vor Wasser durch die Kommune im Vordergrund standen, geht es in der Zukunft um die Bewirtschaftung von (Regen-)Wasser als kommunale und interdisziplinäre Gemeinschaftsaufgabe von allen Gruppen der Gesellschaft: u.a. Verwaltung, Stadtentwässerung, Bürger, Industrie und Politik. Hamburg Wasser stellt im Rahmen des Aufgabengebiets der Stadthydrologie den mess- und rechentechnischen, kommunikativen und wissensbasierten Rahmen für einen ganzheitlichen Ansatz, der Niederschlag und Verdunstung, Oberflächen, Gewässer, Kanalisation, Abfluss, Böden und Versickerung sowie Grundwasser als hydrologische Einheit auffasst. So wird ein zukunftsfähiger Umgang mit Regenwasser (z.B. Umsetzung des RISA-Strukturplans 2030 (2015)) und ein partizipatives und volkswirtschaftlich mögliches Starkregenrisikomanagement in der Praxis unserer Städte möglich.

Paradigm shift in stormwater management of growing cities: *Existing infrastructures of cities and municipalities are subject to permanent development and change. Drivers in Hamburg are the growth of the city, the unrestrained sealing of surfaces and climate change. While municipalities have in the past mainly been aiming for the drainage of and the protection against water. The future demands for a shift to a more sustainable municipal and interdisciplinary co-operation. It is a common task of all groups of society: a.o. administration, utilities, citizens, industries and politics. With its Urban Hydrology team Hamburg Wasser offers the knowledge-based framework with measuring, simulation and visualisation technology for the necessary holistic approach, taking precipitation and evaporation, surfaces, waters, sewers and drains, soils and infiltration as well as groundwater as one hydrological unit. This way it becomes possible to put a sustainable and future oriented stormwater management into practice (e.g. implementation of RISA Structural Plan Rainwater 2030) and to achieve a participatory and economic stormwater risk management for our cities.*

Stadthydrologie und Klima im Wandel

Das Klima ändert sich. Das ist Fakt. Die Auswirkungen sind messbar. So hat sich die globale Durchschnittstemperatur in den letzten 100 Jahren um etwa 1° C erhöht. Der Meeresspiegel ist seitdem um etwa 20 cm gestiegen. Das Meereis der Nordpolarregion hat sich weit zurückgezogen. So wie das Grönlandeis schmelzen auch viele Gebirgsgletscher und große Eismassen der Westantarktis.

Neben den beschriebenen Beobachtungen und Messungen wird auch eine Zunahme von Überflutungen und damit einhergehenden Schäden von Teilen der Gesellschaft wahrgenommen. Begründet wird dies meist mit einer Zunahme von Starkregen durch den Klimawandel.

Die tatsächlichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Niederschlagsgeschehen in unseren Breiten sind allerdings aufgrund zu kurzer hochaufgelöster Messzeitreihen nur teilweise nachweisbar und in ihrer zukünftigen Veränderung schwer vorhersagbar. Bislang können Trends für viele Orte in Deutschland wie auch Hamburg nur für die häufigeren aber weniger intensiven Starkregen nachgewiesen werden, für deren Ableitung die Entwässerungssysteme der Städte und Kommunen bemessen wurden. Für die seltenen und extremen Starkregen, die außerhalb der üblichen Planungsstandards für Entwässerungssysteme liegen, können bislang oft noch keine Trends abgeleitet werden. Die Kanäle und Gewässer werden somit zwar häufiger im Rahmen ihrer geplanten Funktionalität belastet - eine Zunahme an Überflutungen kann allein dadurch aber nicht begründet werden. Zunehmende Überflutungen, ob gemessen oder gefühlt, gehen nicht grundsätzlich mit zunehmenden Starkregen einher. Häufigere und extremere Überflutungen können auch bei



gleichbleibender Niederschlagscharakteristik als Folge einer stetigen Zunahme abflusswirksamer Flächen infolge von Nachverdichtungen unserer Städte auftreten. Darüber hinaus tragen auch nicht mehr ordnungsgemäß funktionierende Infrastrukturen durch eine schleichende Verminderung der Ableitungs- und Retentionskapazitäten von Kanälen, Gewässern und Rückhalteelementen zu Überflutungen bei.

Die bestehenden Infrastrukturen von Städten und Kommunen unterliegen einem permanenten Entwicklungs- und Veränderungsprozess. Ein Bestandteil dieses Prozesses ist der Klimawandel, durch den die stadthydrologischen Parameter Verdunstung und Niederschlag heute noch nicht signifikant, aber langfristig sehr wohl beeinflusst werden. Aktuell ist der maßgebende Bestandteil dieses Veränderungsprozesses vor allem die voranschreitende Versiegelung von Flächen in unseren Städten.

Das Problem extremer Starkregen (z.B. bei Gewittern) wird durch die voranschreitende Versiegelung der Oberflächen weiter verschärft, es kommt dadurch zunehmend mehr Wasser an der Oberfläche zum Abfluss mit dem einhergehenden Risiko, dort zu größeren Schäden zu führen.

Die Zunahme von abflusswirksamen Flächen in einem hydraulischen Einzugsgebiet ist auch aus stadthydrologischer Sicht nachteilig, da die Abflüsse von den Grundstücken in die Kanäle und Gewässer sukzessive zu Lasten von Verdunstung und Versickerung zunehmen.

Hamburg Wasser strebt die Gestaltung einer zukunftsorientierten, ganzheitlichen Stadthydrologie an, die Niederschlag und Verdunstung, Oberflächen, Gewässer, Kanalisation, Böden und Versickerung sowie Grundwasser als Teile einer hydrologischen Einheit versteht und die Belange von Bürgern, Wirtschaft und Natur volkswirtschaftlich ausgewogen berücksichtigen will. Es darf also zukünftig nicht mehr allein um die Ableitung von und den Schutz vor dem Wasser, sondern viel mehr um die vorausschauende Bewirtschaftung des Regenwassers zum Erhalt der städtischen Lebensqualität im Klimawandel gehen. – ein Paradigmenwechsel im Denken und Handeln!

Städtische Niederschlagsentwässerung

Die kommunalen Entwässerungssysteme, zumeist unterirdische Kanäle, sind in der Regel für Bemessungsniederschläge dimensioniert, die mit einer statistischen Wiederkehrzeit für seltene Ereignisse von bis zu fünf bis zehn Jahren auftreten können. Dies stellt für den Regelbetrieb ein gutes Niveau an »Entwässerungskomfort« sicher. Sich verändernde Wetterregime, z.B. auf Grund eines langsameren Strahlstroms, können jedoch einen starken Einfluss auf Niederschlagsintensitäten ausüben. Hinzu kommt das Wachstum vieler Städte und die zunehmende Verdichtung und Versiegelung in den urbanen Gebieten. So kommt eine Studie der VdS[1] aus dem Jahr 2018 zu dem Schluss, dass die 50 einwohnerstärksten Städte Deutschlands einen mittleren Versiegelungsgrad von über 30% besitzen (GDV 2018). Die »Top 10« der am stärksten versiegelten Städte weisen sogar eine Bodenversiegelung von 37% bis 47% auf. Ein Ende ist dabei bislang nicht abzusehen. Wachsende Städte wie Berlin oder Hamburg verzeichnen pro Tag einen Zuwachs an versiegelter Fläche von durchschnittlich über 1.000 bis 2.000 m² (Krüger et al. 2019 & SUVK 2019). Folge ist ein erhöhter Oberflächenabfluss, der von den Kanälen nicht mehr aufgenommen werden kann und zu Überstau aus der Kanalisation und Überflutungen an der Oberfläche führt. Eine Erweiterung der Kanalisation und Auslegung auf höhere Wiederkehrzeiten und größere Wasservolumina ist aus ökonomischer und technologischer Sicht nicht sinnvoll und zielführend. Die Kosten für die dann notwendigen Baumaßnahmen wären mit Blick auf die geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten wirtschaftlich nicht begründbar. Zudem wären massive bauliche Tätigkeiten im öffentlichen Raum notwendig. Es ist daher ein Umdenken notwendig, das den Blick nicht nur auf die unterirdische Infrastruktur werfen lässt, sondern auch die Oberfläche mit einbezieht und einen ganzheitlichen Handlungsrahmen schafft. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die Niederschlagsentwässerung nicht nur in der Sphäre eines Akteurs- nämlich der Entwässerungsbetriebe – relevant ist, sondern dass der Umgang mit Niederschlagswasser zunehmend zu einer kommunalen Gemeinschaftsaufgabe wird. Dies wird besonders deutlich bei dem Aspekt des Starkregenrisikomanagements, bezieht sich jedoch auch auf die Rückhaltung, mögliche Versickerung und Verdunstung von Regenwasser im Allgemeinen. In verschiedenen deutschen Städten wurde dieser Bedarf für eine kommunale Zusammenarbeit bereits realisiert (Becker et al. 2017) und wird unter Namen wie RISA[2] (Hamburg), KURAS[3] (Berlin) oder KLAS[4] (Bremen) weiterverfolgt.

Niederschlagsmessung und Starkregenindex

Hamburg Wasser misst den Niederschlag bereits seit rund 70 Jahren und betreibt ein modernes Regenmess-

[1] *VdS: VdS Schadenverhütung GmbH*

[2] *https://www.risa-hamburg.de/startseite/*
[3] *https://www.regenwasseragentur.berlin/kuras/*
[4] *https://www.klas-bremen.de/*

netz von derzeit 18 Wägemessern. In diesen Geräten wird der aufgefangene Niederschlag mit einer empfindlichen Waage gemessen und minütlich dokumentiert (*Abb. 6.6-1*).

Alle zehn Jahre führt Hamburg Wasser eine Trendanalyse der Starkregen aus den gemessenen Niederschlägen durch. Aus der letzten Untersuchung von 2010 ergab sich keine relevante Häufigkeitszunahme der Starkregen für Hamburg. Lediglich für die häufigen aber unkritischen Starkregen konnte eine leichte Zunahme bestimmt werden, die durch die anstehende Untersuchung in 2020 nochmal auf Plausibilität geprüft wird.

Unabhängig von der Frage, ob Starkregenereignisse zunehmen, ist durch die mediale Präsenz von Überflutungsereignissen und der öffentlichen Debatte über die potentiellen Auswirkungen des Klimawandels, das Bewusstsein für die Notwendigkeit einer Gefährdungsbeurteilung durch Starkregen gestiegen.

In Zukunft soll im Sinne der Transparenz eine Skala etabliert werden, die das Phänomen »Starkregen« besser verständlich und vergleichbar macht. Da es für Starkregen noch keine Nummern-basierte Einteilung und keine Namenskategorisierung gab, wurde 2015 eine Skala von eins bis zwölf entwickelt (Schmitt et al. 2018), anhand der man die Stärke von Starkregen ähnlich der Windstärke einordnen und benennen kann. Die bisherige Statistik der langjährigen Niederschlagsmessungen wurde dabei nicht verändert (DWA 2012 & DWD 2017), sondern der Skala entsprechend zugeordnet. Für extreme Starkregen wurden Erhöhungsfaktoren neu eingeführt. Zudem wurden die abflussseitigen Auswirkungen der unterschiedlichen Starkregenkategorien anhand von Schaubildern verdeutlicht (*Abb. 6.6-2* und *-3*).

Hamburg Wasser hat eine Anwendung entwickelt, die in Echtzeit Niederschlagsinformationen in den Starkregenindex umrechnet und auf einer Starkregenkarte unter hamburgwasser.de/starkregen veröffentlicht (Kuchenbecker 2019). Die Webseite soll helfen, die Bevölkerung für Starkregen und die zu erwartenden Auswirkungen zu sensibilisieren und eine einheitliche Bezeichnung und Einordnung von Starkregen zu etablieren. Oftmals werden Regenereignisse subjektiv schon als Starkregen wahrgenommen, die aber objektiv noch gar kein Starkregen sind. Durch die Echtzeitbeobachtung von Regenereignissen, aber auch durch die Analyse historischer Regenereignisse, soll das Verständnis der Nutzer für die Häufigkeit und die räumliche Verteilung von Starkregen in Hamburg wachsen.

Simulation des Abflussgeschehens

Überflutungsvorsorge ist de facto und zukünftig mehr als in der Vergangenheit eine Gemeinschaftsaufgabe

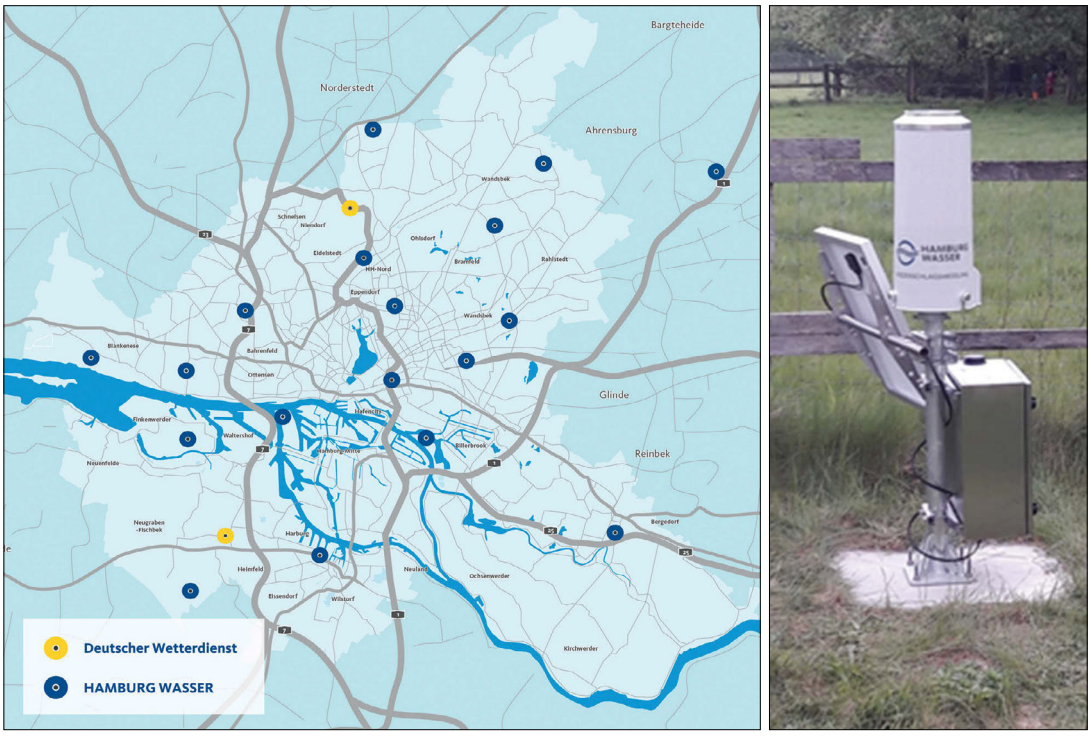


Abb. 6.6-1: *links: Hamburger Regenmessnetz; rechts: Wägemesser,* Hamburg Wasser.

von Kommune und Bürgern. Wichtig ist, die überflutungsgefährdeten Bereiche zu identifizieren. Hamburg Wasser macht dies mit Computersimulationsmodellen, in denen aus der Kombination von Oberflächen-, Kanalnetz-, Gewässer- und Regendaten ein realistisches Bild der Überflutungssituation berechnet werden kann. Diese Informationen können für detaillierte Risikobetrachtungen, beispielsweise in Form einer monetären Abschätzung von möglichen Schäden, verwendet werden. Werden Maßnahmen an der Oberfläche geplant, um das Überflutungsrisiko zu reduzieren, kann die Wirksamkeit dieser Maßnahmen bewertet werden.

Herkömmliche Kanalnetzmodelle sind im Fall von auftretenden Überstauungen nicht in der Lage, den re-

Wiederkehrzeit T [a]	1	2	3.3	5	10	20	25	30	50	100	> 100								
Kategorie	Starkregen				Intensiver Starkregen				außergewöhnlicher Starkregen		extremer Starkregen								
Starkregenindex SRI [-]	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	8		9		10		11		12
Erhöhungsfaktor [-]										1	1.2	1.39	1.4	1.59	1.6	2.19	2.2	2.79	>2,8
Dauerstufe	Niederschlagshöhe hN [mm]																		
5 min	4.9	6.3	7.4	8.2	9.6	11.1	11.5	11.9	13.0	14.4	17	20	20	23	23	32	32	40	40
10 min	7.7	9.7	11.1	12.3	14.3	16.3	16.9	17.5	18.9	20.9	25	29	29	33	33	46	46	58	59
15 min	9.4	11.8	13.6	15.1	17.5	19.9	20.7	21.4	23.2	25.6	31	36	36	41	41	56	56	71	72
20 min	10.6	13.4	15.4	17.1	19.9	22.7	23.6	24.4	26.5	29.3	35	41	41	47	47	64	64	82	82
30 min	12.2	15.6	18.1	20.1	23.5	27.0	28.1	29.0	31.5	34.9	42	49	49	55	56	76	77	97	98
45 min	13.5	17.7	20.7	23.2	27.4	31.5	32.9	34.0	37.1	41.2	49	57	58	66	66	90	91	115	115
60 min	14.3	19.1	22.6	25.4	30.3	35.1	36.6	37.9	41.4	46.2	55	64	65	73	74	101	102	129	129
90 min	15.8	20.9	24.6	27.7	32.8	37.9	39.5	40.9	44.7	49.8	60	69	70	79	80	109	110	139	139
2 h	17.0	22.3	26.2	29.4	34.7	40.1	41.8	43.2	47.1	52.5	63	73	74	83	84	115	116	146	147

Abb. 6.6-2: *Aus KOSTRA-DWD 2010R (DWD 2017) ausgewählte Niederschlagssummen und Dauerstufen als Grundlage für den Hamburger Starkregenindex (Auszug),* Hamburg Wasser.

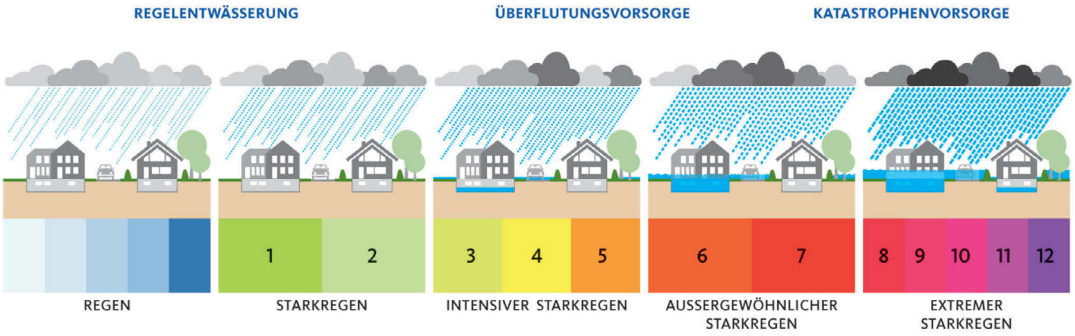


Abb. 6.6-3: *Hamburger Darstellung des Starkregenindex zur Risikokommunikation,* Hamburg Wasser.

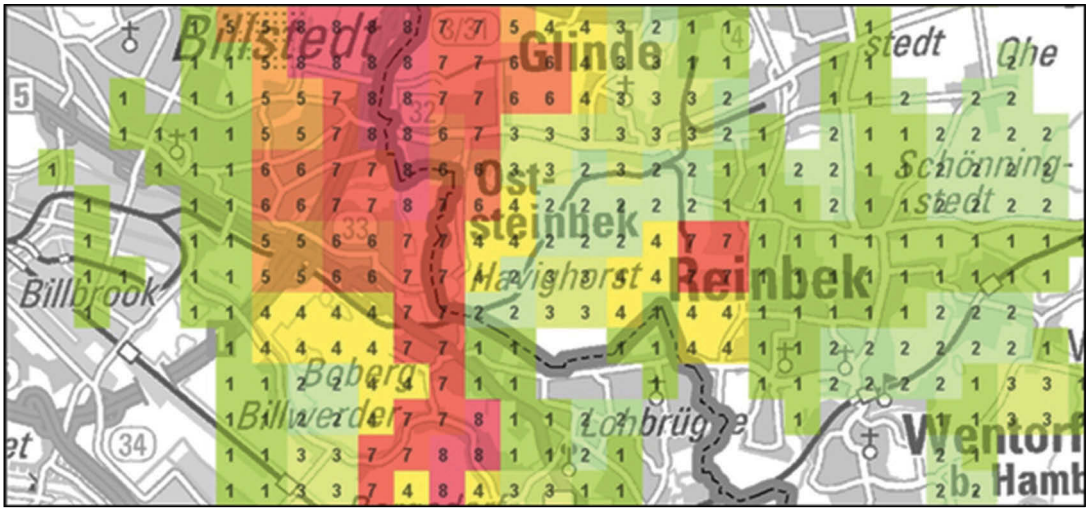


Abb. 6.6-4: *Auszug aus Hamburger Starkregenkarte, Extremer Starkregen 10. Mai 2018, die maximale Regen-intensität von 73 mm in zwei Stunden entsprach SRI-8,* Hamburg Wasser.

sultierenden Abfluss auf der Oberfläche abzubilden. Sie verwenden stark vereinfachende Modelle bei der Behandlung der Überstauvolumina.

Die Verwendung von detaillierten Oberflächenabflussmodellen in Kombination mit Kanalnetz-modellen in einem bidirektional gekoppelten digitalen Gesamtmodell stellt ein geeignetes Werkzeug für den Fall eines überlasteten Kanalnetzes dar. Die alleinige 2D-Berechnung des Oberflächenabflusses ohne Berücksichtigung des Kanalnetzes ist im Regelfall nicht ausreichend (Fuchs et al. 2015).

Maßnahmen zum Umgang mit Niederschlagswasser im urbanen Bereich

Um einen übermäßigen Abfluss mit möglicherweise daraus resultierenden Überflutungsschäden zu reduzieren, ist es notwendig, in der Fläche Rückhaltemöglichkeiten für das Wasser zu schaffen. Im Idealfall sehen diese die Möglichkeit vor, dass das Niederschlagswasser verdunsten und versickern kann und damit möglichst lokal wieder dem natürlichen Wasserkreislauf zugeführt wird (vgl. hierzu auch RISA Strukturplan Regenwasser 2030 (HSE/BUE 2015)). Dies kann bereits direkt am Gebäude beginnen, das über Gründächer den Abfluss von Dachflächen reduziert und als Wasserspeicher fungieren kann. Besonders zielführend sind hier so genannte Retentions-Gründächer, die das Wasser unterhalb des Begrünungsaufbaus noch auf dem Dach zurückhalten können und zeitverzögert und gedrosselt abgeben. Auch Fassadenbegrünungen als bodengebundene oder wandgebundene Systeme können über Regenwasser gespeist werden und tragen somit nicht nur zur Reduktion des Abflusses bei, sondern kühlen das Gebäude, sorgen mit ihrer Verdunstungsleistung und ihrer Absorptionsleistung für »frische Luft« und tragen dazu bei, Schadstoffe und Feinstaub sowie den Wärmeinseleffekt in Städten zu reduzieren. Nebenbei folgt auch eine optische Aufwertung und ein positiver Effekt auf das Stadtökosystem.

Auch auf Grundstücken und Freiflächen im öffentlichen Raum sollte das Ziel sein, so wenig wie möglich des gering belasteten Regenwassers in die Kanalisation abzuleiten. Hierfür ist die Entsiegelung und Begrünung von Flächen eine geeignete Maßnahme. Eine gezielte Versickerung in der Fläche, in Mulden oder in technischen Anlagen wie Rigolen oder auch die Retention von Niederschlagswasser in Teichen bieten nicht nur wasserwirtschaftliche Vorteile, sondern befördern auch die Elemente der Stadtnatur. Eine stärkere Verbindung und die Schaffung von Synergieeffekten zwischen Entwässerung und Freiraumplanung hin zu einer grün-blauen Infrastruktur für die Regenwasserbewirtschaftung erscheint als zukunftsfähiger Pfad mit zahlreichen Vorteilen auch hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels wie Starkregen und Hitzestress. In einer Szenarien-Analyse für Kiruna konnte gezeigt



Abb. 6.6-5: *Identifizierung gefährdeter Gebiete in Hamburg durch gekoppelte Überflutungsmodellierung von Oberfläche und Gewässer (2D) sowie Kanalnetz (1D) mit Regenradardaten, aus datenschutzrechtlichen Gründen ohne Koordinaten, Wassertiefen von 2 cm bis 60 cm werden in blau, größer als 60 cm in violett dargestellt, die roten Dreiecke sind Aus- und Einlaufbauwerke zwischen Kanal und Gewässer,* Hamburg Wasser.

werden, dass eine Stadttransformation inklusive naturnaher, grün-blauer Entwässerungsanlagen, zu einer deutlichen Robustheitssteigerung führen kann (Zischg et al. 2017). Dieser Ansatz wird seit 2013 in China als *sponge-city* bzw. Schwammstadt verfolgt (Liu et al. 2017), aber auch der Begriff der wassersensiblen Stadtentwicklung bzw. water sensitive urban design trifft dieses Konzept, das eine starke Integration und gemeinsame Betrachtung von wasserwirtschaftlichen mit stadt-, freiraum- und straßenplanerischen Aspekten fordert.

Starkregenrisikomanagement

Eine integrierte und als kommunale Aufgabe verstandene Herangehensweise erfordert auch das Starkregenrisikomanagement für außergewöhnliche und extreme Starkregen. In diesen Fällen wird mehr und mehr die temporäre „Nutzung“ von Verkehrs- und Freiflächen relevant sowie ein gezielter Objektschutz. Das bedeutet, nicht nur die kommunalen Akteure aus den verschiedenen Planungsbereichen müssen sich zu diesem Thema austauschen, sondern es ist auch eine gezielte Sensibilisierung von Bürgern und Information hinsichtlich geeigneter Maßnahmen notwendig.

Ausgehend vom identifizierten Risiko mittels Analysen der Überflutungsgefährdung sowie des möglichen Schadenspotentials ist eine zielgruppengerechte Risikokommunikation notwendig. Haus- und Grundstückseigentümer benötigen Aufklärung hinsichtlich der notwendigen und sinnvollen Objektschutzmaßnahmen und stehen in der Verantwortung, diese auch umzusetzen. Eine zusätzliche Absicherung über Versicherungen ist ein weiteres Element, das zu einer schnelleren Überwindung des »finanziellen Schocks« nach Schadensereignissen führen kann, und damit die Resilienz hinsichtlich Starkregenereignissen erhöht (Hauner 2019).

Darüber hinaus sind je nach Randbedingungen auch Maßnahmen zur Überflutungsvorsorge im öffentlichen Raum notwendig. Eine vielversprechende Handlungsoption ist dabei die so genannte multifunktionale Nutzung von Freiflächen (Multicodierung von Flächen) (Scheid et al. 2018).

In Hamburg wurden im Rahmen des Projektes RISA (Regeninfrastrukturanpassung) bereits mehrere solcher Projekte zur multifunktionalen Flächennutzung umgesetzt. So wurde in einem Fall auf einem öffentlichen Spielplatz ein Retentionsraum für außergewöhnliche Regenfälle geschaffen, um die Überflutung einer nahegelegenen Schule zu vermeiden. In einem zweiten Projekt wird Niederschlagswasser von einer überflutungsgefährdeten Straße im Starkregenfall über einen so genannten Notwasserweg in einen Park geleitet, wo das Wasser aufstauen und in einer natürlichen Mulde versickern kann. Ein drittes, ähnliches Projekt ist bereits in Umsetzung in einem anderen Einzugsgebiet, in dem es in der Vergangenheit regelmäßig zur Überflutung im Bereich eines tiefergelegenen Straßenabschnitts kam. Bevor das Niederschlagswasser an einem Tiefpunkt aus der Kanalisation austritt, soll das

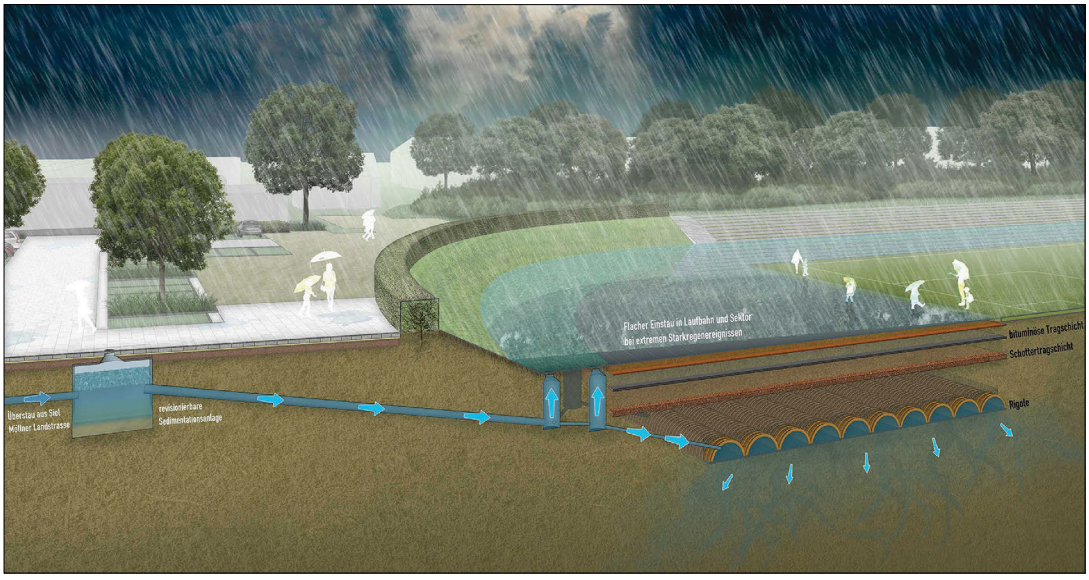


Abb. 6.6-6: *Prinzipdarstellung der Kanalentlastung und der Nutzung der Sportfläche zur Überflutungsvorsorge im Starkregenfall, Schleifenbaum et al. (2019).*

überschüssige Wasser im Fall eines Starkregens einer nahegelegenen Sportanlage zugeführt werden und dort über ein Rigolensystem versickern (Schleifenbaum et al. 2019) (s. *Abb. 6.6-6*).

Die bisherigen Erfahrungen mit Projekten zur multifunktionalen Flächennutzung in Hamburg zeigen, dass eine positive und konstruktive Zusammenarbeit über Organisations- und Disziplingrenzen hinweg den größten Erfolgsfaktor darstellt. Noch können Zuständigkeitsfragen oder Sicherheitsbedenken solche Projekte zum Scheitern bringen. Fragen zu Betrieb und Unterhalt müssen zwischen den beteiligten Akteuren geklärt werden. Eine Blaupause gibt es aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen bisher nicht, so dass diese Fragen jeweils spezifisch für die umzusetzende Maßnahme geklärt werden müssen. Weitere Erfahrungen und übergeordnete Leitlinien können jedoch eine Erleichterung bei der Planung und Umsetzung solcher Maßnahmen bringen.

Die Regenwasserbewirtschaftung der Zukunft in wachsenden urbanen Räumen kann also nicht mehr als eine allein technisch zu lösende Herausforderung gesehen werden. Sie erfordert eine breite kommunale Zusammenarbeit und ein gemeinsames Verständnis zwischen den verschiedenen beteiligten Fachdisziplinen. Vernetzung und Kooperation sind dabei wesentliche Erfolgsfaktoren.

Literatur

BECKER M., CH. FALK, M. SIEKMANN & R. SCHUMACHER (2017): Vernetzung und Zusammenarbeit befördern wassersensitive Stadtentwicklung. Korrespondenz Wasserwirtschaft 2017 (10) 5, 265-268.

DWA (2012): Arbeitsblatt DWA-A 531: Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef, ISBN 978-3-94 2964-28-9.

DWA (2017): Themenheft DWA T2/2017: Niederschlagserfassung durch Radar und Anwendung in der Wasserwirtschaft, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef, ISBN 978-3-88721-478-4.

DWD (2017): Deutscher Wetterdienst, KOSTRA-DWD-2010R, Starkniederschlagshöhen für Deutschland – KOSTRA, DWD, Offenbach, 2017.

GDV (2018): München ist die am stärksten versiegelte Großstadt. https://www.gdv.de/de/medien/aktuell/muenchen-ist-die-am-staerksten-versiegelte-grossstadt-36418, Letzter Zugriff am 12.07.2019.

FUCHS L. & N. SCHMIDT (2015): Vergleich von 2-dimensionalen Berechnungsansätzen für die Gefährdungsanalyse in urbanen Gebieten, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, (2015) 67, 187-196.

HAUNER O. (2019): Risikovorsorge bei Überschwemmungen – Eine Gemeinschaftsaufgabe. Forum Hochwasserrisikomanagement, Band 11: 23-29.

HSE/BUE (2015): RISA Strukturplan Regenwasser 2030, Ergebnisbericht des Projektes RISA – RegenInfraStrukturAnpassung; Hrsg.: Hamburger Stadtentwässerung (HSE) und Behörde für Umwelt und Energie (BUE); Hamburg, Juni 2015. *https://www.risa-hamburg.de/downloads/alle-downloads/*.

KRÜGER T., M. SCHORCHT & A. HARTMANN (2019): Bodenversiegelung und Flächenneuinanspruchnahme in Deutschland – aktuelle Ergebnisse des IÖR-Monitors. DFNS 2019, 11. Dresdner Flächennutzungssymposium.

KUCHENBECKER A. (2019): Starkregenindex für Hamburg. Regenwassertage 2019, Tagungsband: 32-35, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef.

LIU H., Y. JIA & C. NIU (2017): »Sponge city«-concept helps solve China's urban water problems. Environmental Earth Science 76: 473.

SCHEID CH., J. BENDEN, R. BROESI et al. (2018): Lösungswege und Erfolgsfaktoren für die Konzeption multifunktionaler urbaner Retentionsräume – Erfahrungen aus dem Projekt MURIEL. Regenwasser in urbanen Räumen – aqua urbanica trifft RegenwasserTage 2018, Tagungsband: 67-80.

SCHMITT T. G., M. KRÜGER, A. PFISTER, M. BECKER, C. MUDERSBACH, L. FUCHS, H. HOPPE & I. LAKES (2018): Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall (65), Nr. 2, S. 113-120, DOI: 10.3242/kae2018.02.002.

SCHLEIFENBAUM J., F. MEINZINGER, G. BISCHOFF & M. STAUSS (2019): Multifunktionale Nutzung eines Sportplatzes für die Überflutungsvorsorge – Das Hein-Klink-Stadion in Hamburg-Billstedt. Korrespondenz Wasserwirtschaft 2019 (12) Nr. 8.

SUVK (2019): Flächenverbrauch und Versiegelung. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz. *http://www.berlin.de/senuvk/umwelt/bodenschutz/de/vorsorge/versiegelung.shtml. Letzter Zugriff am 12.07.2019.*.

ZISCHG J., M. GONCALVES, G. LEONHARDT et. al. (2017): Transformation der Stadtentwässerung unter Berücksichtigung von »grüner« und »blauer« Infrastruktur. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft (2017) 69:180-185.

Kontakt:

Christian Günner
Franziska Meinzinger
Andreas Kuchenbecker
Infrastrukturkoordination & Stadthydrologie
Hamburg Wasser
Christian.Guenner@hamburgwasser.de

Günner C., F. Meinzinger & A. Kuchenbecker (2019): Paradigmenwechsel im Umgang mit dem Regenwasser in wachsenden Städten. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 233-239. Online: www.warnsignal-klima.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.34.

6.7 Verbesserung der Luftqualität und Verringerung des Lärms in Städten

Susanne Schubert, Annett Steindorf & Johanna Appelhans

Der dringend notwendige zusätzliche Wohnraum in den Ballungsräumen wird vorranging durch Verdichtung in der Stadt realisiert. Um verdichtete und durchmischte Stadtquartiere mit guter Luft und wenig Lärm zu schaffen, sind Planer und Städtebauer gefordert. Für die Verringerung des Lärms sind geschlossene städtebauliche Strukturen wie Blockrandbebauung oder andere lärmabschirmende Maßnahmen von Vorteil. Für saubere Luft sind die Durchlüftung der Quartiere, insbesondere durch Luftleitbahnen, und die Freihaltung von größeren unbebauten Flächen ein zentrales Anliegen. Diese unterschiedlichen Anforderungen an den Städtebau in Einklang zu bringen, ist eine wichtige planerische Aufgabe, deren Zielkonflikte sich nicht allein städtebaulich lösen lassen. Das wichtigste Handlungsfeld zur Verbesserung der Luft und Verringerung des Lärms ist der Straßenverkehr. Maßnahmen zum Erreichen der notwendigen Verkehrswende erzeugen Synergien, die Luftbelastung und Lärm mindern.

Improvement of air quality and reduction of noise in cities: *The urgently needed living space in growing agglomerations is primarily realized through inner urban development. To develop compact and mixed used urban quarters with high standards of air quality and noise protection, good solutions of urban planning and design are required. A noise sensitive urban development needs closed urban structures, as for example perimeter block development or other noise shading measures. For air quality ventilation, especially through fresh air corridors, within the urban quarters as well as areas for fresh air generation are important. To bring these divergent needs in urban development in accordance is a major task for urban planning. However, the conflict of goals will not be solved by urban development only. The most important field of action to improve air quality and reduce noise is traffic. Measures to reach a transformation in traffic create synergies for both air quality control and noise protection.*

Städte vereinen viele unterschiedliche Nutzungen auf engem Raum. Aus dem Nebeneinander von Wohnen, Gewerbe, Verkehr, Sport- und Freizeitnutzungen ergeben sich Belastungen für Umwelt und Gesundheit. Diese zu vermeiden und zu verringern, ist eine wichtige Aufgabe, um gesunde Lebensbedingungen in der Stadt zu gewährleisten. Vermeidung von Luftverschmutzung und die Verringerung von Lärm spielen dabei eine zentrale Rolle.

In den vergangenen Jahren haben verschiedene Maßnahmen dazu geführt, dass die Luftschadstoffbelastung in Deutschland zurückgegangen ist. Dazu zählen technische Maßnahmen wie Abgasnachbehandlungssysteme (z. B. Filter und Katalysatoren) und emissionsärmere Brennstoffe, aber auch nicht-technische Maßnahmen wie bspw. die Einführung und Verschärfung von Umweltzonen. Trotzdem sind viele Menschen – vor allem in Ballungsräumen – nach wie vor zu hohen Schadstoffkonzentrationen ausgesetzt. Mit Blick auf die Gesundheit sind momentan in Deutschland vor allem drei Spurenstoffe ein Problem: Feinstaub (PM_{10} und $PM_{2,5}$)[1], Stickstoffdioxid (NO_2) und Ozon (O_3)[2] (Umweltbundesamt 2019b). Die genannten Luftschadstoffe verursachen u. a. Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. In vielen deutschen Städten wird der derzeit geltende NO_2-Jahresmittelwert von 40 µg/m³ überschritten. Hauptverursacher der NO_2-Belastungen ist der Straßenverkehr. Die Feinstaubbelastung ist in den vergangenen Jahren zwar deutlich zurückgegangen, aufgrund der einhergehenden Gesundheitsrisiken ist eine weitere Reduktion der Belastung jedoch notwendig. Hohe Ozonkonzentrationen treten überwiegend nicht in Städten, sondern am Stadtrand und in ländlichen Gebieten auf, da Ozon in den Städten bei der Umwandlung von NO in NO_2 abgebaut wird. Daneben bilden Geruchsimmissionen ein eigenes Handlungsfeld. In Städten auftretende Konflikte sind bspw. auf Industrieanlagen (bspw. Lebensmittelindustrie) zurückzuführen. Häufiger treten Konflikte mit Geruchsimmissionen im ländlichen Raum auf, wenn Wohnungen bspw. in der Nähe von landwirtschaftlichen Betrieben mit Tierhaltung geplant werden.

Auch für die Verringerung des Lärms ist der Straßenverkehr von großer Bedeutung. In Deutschland sind rund 60 Millionen Menschen von Lärm aus zwei oder mehr Quellenarten betroffen (vgl. *Abb. 6.7-1*). Allein vom Straßenverkehrslärm sind etwa 2,3 Millionen Menschen LDEN[3]-Pegeln von über 65 dB(A) ausgesetzt, vom Schienenverkehrslärm etwa 1 Million Menschen. Betrachtet man lediglich den Nachtzeitraum, verdoppelt sich die durch den vom Schienenverkehr

[1] *PM_{10} bzw. $PM_{2,5}$ bezeichnen Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern bzw. weniger als 2,5 Mikrometern (µm). Feinstaub entsteht vor allem bei Verbrennungsprozessen in Kraftfahrzeugen, in Kraftwerken und Industrieanalgen, in Kleinfeuerungsanlagen, durch Bodenerosion und aus Vorläuferstoffen wie Schwefeldioxid (SO_2), Stickstoffoxiden (NO_x) und Ammoniak (NH_3).*

[2] *Ozon entsteht in Bodennähe bei intensiver Sonneneinstrahlung durch komplexe photochemische Prozesse aus Ozonvorläufersubstanzen, vor allem aus Stickstoffoxiden (NO_x) und flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC).*

belastete Bevölkerung auf 2 Millionen Menschen. Damit ist zwar der Straßenverkehrslärm die Geräuschquelle, die die höchsten Belastungen (ab über 65 dB(A)[4]) und Belästigungen hervorruft, jedoch tragen auch der Schienenverkehrslärm und weitere Geräuschquellen, wie Industrie- und Gewerbelärm, Nachbarschaftslärm und Fluglärm, zur Lärmbelastung der Bevölkerung bei.

Viele Städte und Ballungsräume in Deutschland erleben seit Jahren einen starken Zuzug. Der dringend notwendige Wohnraum wird dabei, nicht zuletzt aus Gründen des Flächensparens, verstärkt durch Innenentwicklung realisiert. Angesichts der zunehmenden baulichen Verdichtung und Nutzungsmischung in den Städten stellen sich verschiedene Fragen: Was muss für die Verbesserung der Luft und Verringerung des Lärms in Städten getan werden? Welche Synergien und Zielkonflikte bestehen zwischen Maßnahmen zur Luftreinhaltung und zur Lärmminderung? Und welche städtebaulichen und planerischen Maßnahmen und Instrumente könnten zur Lösung beitragen?

Grenz-, Richt-, und Zielwerte für Lufthygiene und Lärm in Städten

Für die Luft und den Lärm in Städten gelten in Deutschland Grenz-, Richt- oder Zielwerte in unterschiedlicher Verbindlichkeit. Die Regelung der Lärmvorschriften ist quellenbezogen gestaltet. Für den Lärmschutz an bereits bestehenden Straßen und Schienenwegen existieren derzeit keine Regelungen, sondern nur freiwillige Lärmsanierungsprogramme der verschiedenen Baulastträger. Die Sanierungswerte sind nach unterschiedlichen Gebietskategorien differenziert und liegen am Tag zwischen 67 bis 72 dB(A) und in der Nacht zwischen 57 bis 62 dB(A). Es ist sicherzustellen, dass keine schädlichen Umwelteinwirkungen durch Verkehrsgeräusche hervorgerufen werden können, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind (Vermeidungsgebot). Das Vermeidungsgebot gilt jedoch nicht, wenn die Kosten der Schutzmaßnahmen unverhältnismäßig erscheinen (Kosten-Nutzen-Bilanz) (Stüer 2015, Rn. 8116). Werden die Immissionsgrenzwerte für Lärm überschritten, hat der betroffene Eigentümer einen Anspruch auf angemessene Entschädigung (bspw. durch passiven Schallschutz) (Heilshorn 2009: 137). Insgesamt liegen die tatsächlichen Werte für Straßen- und Schienenverkehrslärm in Deutschland regelmäßig deutlich höher als die von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfohlenen Werte. Andere Lärmquellen sind in eigenen Regelungswerken geregelt. So gilt bspw. für Gewerbelärm die Technische Anleitung Lärm (TA Lärm), die ebenfalls gebietsbezogen Grenzwerte definiert (bei Kern-, Dorf- und Mischgebieten bspw. 60 dB(A) am Tag und 45 dB(A) in der Nacht).

Für die Luft ist die EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG entscheidend, die durch die 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (39. BImSchV) in deutsches Recht umgesetzt wurde. Diese legt Grenzwerte u. a. für die Konzentra-

[3] *Lärmindex Day/Evening/Night*
[4] *dB(A): Dezibel frequenzbewertet, zur Anpassung an das Hörempfunden des menschlichen Gehörs*

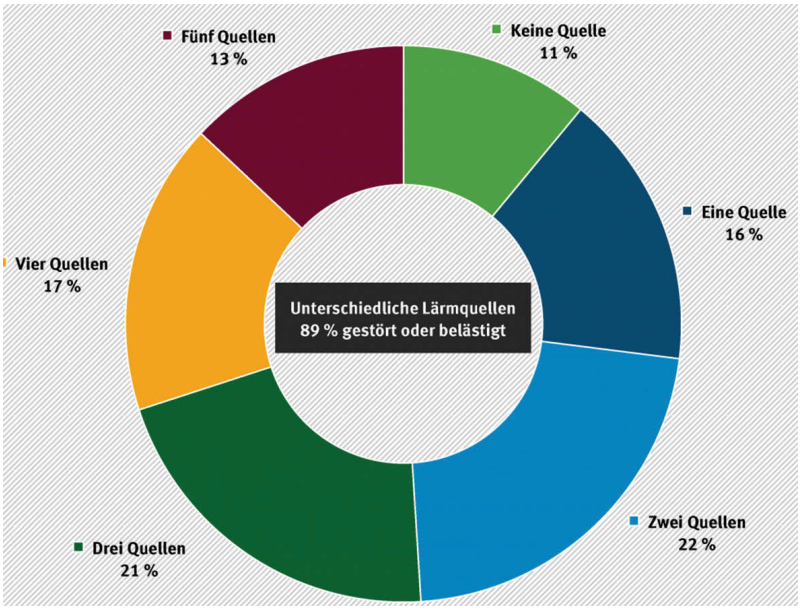


Abb. 6.7-1: *Lärmbelästigung durch mehrere Lärmquellen (in %) (Quelle: Umweltbundesamt 2019e).*

tionen der Schadstoffe Feinstaub (PM_{10} und $PM_{2,5}$) und Stickstoffdioxid (NO_2) sowie Zielwerte für Ozon (O_3) in der Außenluft fest[5]. Zusätzlich gibt es Empfehlungen der WHO (WHO 2001 und WHO 2006), die größtenteils strenger sind als die verbindlich einzuhaltenden EU-Grenzwerte. *Tab. 6.7-1* stellt den in der EU-Luftqualitätsrichtlinie festgelegten Grenz- und Zielwerten die WHO-Empfehlungen gegenüber.

Für Geruchsimmissionen ist die »Geruchsimmissionsrichtlinie« (GIRL), entwickelt vom Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI), entscheidend, die in den Bundesländern in rechtlich unterschiedlicher Form umgesetzt wurde. Sie soll im Rahmen der Abwägung in der Bauleitplanung Orientierung zur Zumutbarkeit oder Unzumutbarkeit von Geruchsimmissionen bieten. Dabei werden, wie auch in der TA Lärm, bezogen auf die jeweiligen Nutzungsgebiete, Immissionswerte zur Beurteilung der Erheblichkeit von Geruchswirkungen festgelegt (vgl. Beurteilungskriterien der GIRL 2008).

Straßenverkehr als Hauptursache für Luft- und Lärmprobleme in der Stadt

Das wichtigste Handlungsfeld zur Verbesserung der Luft und Verringerung des Lärms ist der Straßenverkehr, der die dominierende Lärmquelle in Deutschland ist (vgl. *Abb. 6.7-2*). Er ist zudem der Hauptverursacher der NO_2-Belastung in Städten und eine wichtige Feinstaubquelle. Nach wie vor wird der NO_2-Jahresmittelwert von 40 µg/m³ an zahlreichen verkehrsnahen Messstationen überschritten. Im Jahr 2018 kam es an knapp 40 % der verkehrsnahen Stationen (Umweltbundesamt 2019a) zu Überschreitungen. Es sind also viele Menschen, besonders entlang stark befahrener Straßen, von hohen NO_2-Konzentrationen betroffen. Die gesetzlich geltenden Grenzwerte für Feinstaub werden in Deutschland zwar seit einigen Jahren mit wenigen Ausnahmen eingehalten. Da aber auch geringere Belastungen der Gesundheit schaden können, ist eine weitere Minderung der Feinstaubbelastung notwendig, um die Bevölkerung noch besser zu schützen.

Weniger motorisierter Individualverkehr (MIV) in den Städten hätte eine starke, positive Wirkung auf beide Umweltprobleme – und nicht nur das: Mit weniger Autos in den Städten könnte zugleich die für den Autoverkehr benötigte Fläche reduziert und damit wertvoller Raum für Wohnen und Grün in der Stadt geschaffen werden. Das Umweltbundesamt hat daher das Ziel formuliert, maximal 150 PKW pro 1.000 Einwohnern in Großstädten zu erreichen (Umweltbundesamt 2017). Die aktuelle PKW-Dichte ist, je nach Stadt, ca. 2-3 Mal so hoch.

Um weniger motorisierten Individualverkehr in den Städten zu erreichen, braucht es eine Vielzahl aufeinander abgestimmter Instrumente. Zentral sind eine integrative Planung (Stadtentwicklung, Verkehrsplanung, Lärmminderung, Luftreinhaltung) und die strategische Umsetzung des Leitbilds einer kompakten, funktionsgemischten Stadt der kurzen Wege, über die Bauleit- und Freiraum-planung. Hervorzuheben sind Maßnahmen der Verkehrsentwicklungsplanung, Nah-

[5] *Die Richtlinie 2008/50/EG legt zudem noch Grenzwerte für Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid (CO), Blei (Pb) und Benzol (C_6H_6) fest.*

Tab. 6.7-1: *Grenzwerte für Luftschadstoffe zum Schutz der menschlichen Gesundheit nach der EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG und WHO-Empfehlungen (Quelle: Umweltbundesamt 2019d).*

Schadstoff	Mittelungszeitraum	Einheit	Grenz- und Zielwerte nach Richtlinie EU 2008/50/EG* (zulässige Überschreitungen pro Kalenderjahr)	WHO-Empfehlungen (zulässige Überschreitungen pro Jahr)
			Grenzwerte	Richtwerte
Feinstaub PM_{10}	Jahresmittelwert	µg/m³	40	20
	Tagesmittelwert	µg/m³	50 (35-mal)	50 (3-mal)
Feinstaub $PM_{2,5}$	Jahresmittelwert	µg/m³	25	10
	Tagesmittelwert	µg/m³	-	25 (3-mal)
Stickstoffdioxid (NO_2)	Jahresmittelwert	µg/m³	40	40
	1-Stundemittelwert	µg/m³	200 (18-mal)	200
			Zielwert	Richtwert
Ozon (O_3)	Höchster 8-Stundenmittelwert pro Tag	µg/m³	120 (25-mal, gemittelt über 3 Jahre)**	100

*Die EU-Grenzwerte für PM_{10} sind seit 2005 einzuhalten, die Grenzwerte für NO_2 und der Zielwert für O_3 seit 2010. Für $PM_{2,5}$ war ab 2010 ein Zielwert von 25 µg/m³ vorgegeben, seit 2015 ist der Grenzwert von 25 µg/m³ verbindlich einzuhalten.
** Langfristig sollen die 8-Stundemittelwerte 120 µg/m³ gar nicht mehr überschreiten (Langfristziel).

verkehrskonzepte und Parkraumbewirtschaftung, die eine entscheidende Rolle bei der Verlagerung auf umweltschonendere Verkehrsmittel (Fuß, Fahrrad, Bus, Straßenbahn, Bahn, E-Carsharing) spielen. Für den Anteil des MIV, der sich nicht vermeiden oder verlagern lässt, sind weitere Maßnahmen zur Lärmminderung und Verbesserung der Luft notwendig. Technische Maßnahmen zur Lärmminderung an der Quelle sollten durch ihre flächendeckende Wirkung Vorrang vor lokal wirksamen Lärmschutzwänden, -wällen oder -fenstern haben. Beispiele sind leisere Fahrzeuge und lärmabsorbierende Fahrbahnbeläge. Als passive Lärmminderungsmaßnahmen kommen die Einrichtung der Tempo-30-Zone, die nächtliche Geschwindigkeitsbegrenzung auf Tempo 30 an Hauptverkehrsstraßen, LKW-Umleitung, LKW-Fahrverbote (Nacht- und Ortssperrung), leise Liefer- und Citylogistik in Betracht (Supplies et al. 2018). Für die Verbesserung der Luftqualität spielt die aktuelle Debatte um die Einhaltung der Euro-Abgasgrenzwerte für NOx eine zentrale Rolle, wobei nach Berechnungen des Umweltbundesamtes v. a. die Nachrüstung mit SCR[6] -Katalysatoren eine entscheidende Wirkung versprechen (Umweltbundesamt 2018) Maßnahmen, die die Städte darüber hinaus zur Minderung der NO_2-Belastung und Feinstaubbelastung einsetzen können, sind u. a. Fahrverbote für ältere Dieselfahrzeuge, Durchfahrverbote für Lkws auf bestimmten Strecken oder ebenfalls Geschwindigkeitsbegrenzungen.

Eine Schwierigkeit bei der Minderung von Luftschadstoffbelastungen ist, dass nicht nur lokale Quellen (z. B. der lokale Straßenverkehr) zur Luftschadstoffbelastung in den Städten beitragen, sondern ein Teil der Belastung von außerhalb in das Stadtgebiet hineintransportiert wird (Ferntransport). Insbesondere bei der Feinstaubbelastung ist der Anteil solcher nicht-lokal beeinflussbarer Quellen relativ groß. Eine erfolgreiche Luftreinhaltepolitik muss deshalb auf allen Ebenen (lokal, regional, national, international) ansetzen und gut aufeinander abgestimmt sein. Dabei gibt es keine »Universalmaßnahmen«, die die Luftbelastung in jeder Stadt wirksam reduzieren können. Vielmehr braucht jede Stadt ein maßgeschneidertes Luftreinhaltekonzept, das die lokalen Gegebenheiten (z. B. Lage, Topographie, Infrastruktur, klimatische Bedingungen) berücksichtigt.

Die zunehmend kompakte und funktionsgemischte Stadt: Auswirkungen und Herausforderungen für Lärmminderung und Luftreinhaltung

In der Stadtplanung gibt es den Grundsatz, störende Nutzungen, wie Gewerbe und Industrie, räumlich von sensiblen Nutzungen, insbesondere Wohnen, zu trennen

[6] *Selektive katalytische Reduktion*

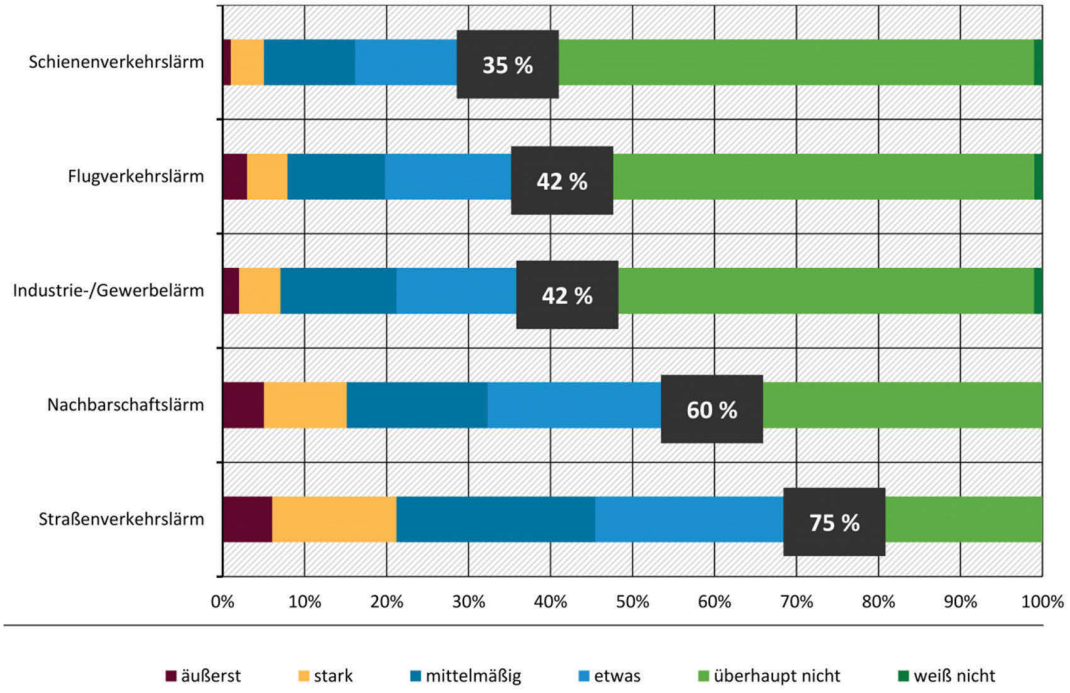


Abb. 6.7-2: *Lärmbelästigung in Deutschland – Hauptursache Straßenverkehr (Quelle: Umweltbundesamt 2019f).*

(Trennungsgebot, §50 BImSchG). Demgegenüber steht das Leitbild einer kompakten und funktional wieder stärker durchmischten Stadt. Die kleinteilige Mischung von Wohnen, Arbeiten, Gewerbe und Freizeitnutzungen stehen für den urbanen Charakter der europäischen Stadt und hohe Aufenthaltsqualitäten (BMUB 2015). Durch veränderte Wirtschaftsstrukturen und technischen Fortschritt sind die Emissionen von Gewerbebetrieben in der Stadt zurückgegangen. Trotzdem können Zielkonflikte zwischen dem Immissionsschutz und einer verdichteten und funktional durchmischten Stadtstruktur bestehen. Häufig zeigen sich diese Konflikte bei der Entwicklung von Wohnbebauung in der Nähe von Gewerbebetrieben, insbesondere hinsichtlich der Lärmbelastung. Geruchsimmissionen können dabei ebenfalls eine Rolle spielen, bspw. wenn im Zuge von innerstädtischer Entwicklung Wohngebiete in der Nähe von Chemieindustrie, Lebensmittelfabriken oder Abfallbehandlungsanlagen errichtet werden.

Um Nachverdichtung und stärkere Durchmischung planungsrechtlich zu erleichtern, wurde die Baugebietskategorie »Urbanes Gebiet« eingeführt (§ 6a Baunutzungsverordnung, BauNVO). Unter Absenkung des Lärmschutzniveaus am Tag wurde den Städten hiermit die Möglichkeit eröffnet, einen höheren Wohnanteil, eine höhere städtebauliche Dichte und eine erleichterte Nutzungsmischung von Wohnen und Gewerbe zu realisieren. Parallel zur Einführung des „Urbanen Gebiets" erfolgte die Änderung der Sechsten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm). Der zulässige Immissionsrichtwert für Lärm ist für das Urbane Gebiet auf 63 dB(A) festgesetzt worden (bisher: 60 dB(A) für Mischgebiet). Nachts wurde der zulässige Immissionsrichtwert von 45 dB(A), der auch für Mischgebiete gilt, übernommen. Die höhere städtebauliche Dichte und Nutzungsmischung bedeutet zwar kurze Wege, erfordert im Umkehrschluss aber auch eine höhere Duldungspflicht für Wohnnutzungen gegenüber Gewerbelärmimmissionen.

Der Schutz der öffentlichen Gesundheit muss auch in einer verdichteten und durchmischten Stadt eine hohe Priorität haben. Deshalb sind Maßnahmen erforderlich, die die Bevölkerung vor schädlichen Lärmauswirkungen schützen. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO), Regionalbüro für Europa, veröffentlichte 2018 die ‚Leitlinien für Umgebungslärm für die Europäische Region' (WHO Europa 2018) und gibt Empfehlungen für den Schutz der menschlichen Gesundheit vor Umgebungslärm aus verschiedenen Quellen, wie Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm, Fluglärm, Freizeitlärm. Diese Empfehlungen leisten einen wichtigen Baustein in der politischen Diskussion zur Definition und Ausgestaltung eines Schutzanspruches. Denn eine Absenkung des Lärmschutzes weist immer einen Bezug zu höherer Gesundheitsbelastung auf.

Städtebauliche und planerische Lösungen zur Minderung von Lärm und Verbesserung der Luftqualität

Angesichts der Zielsetzung, verdichtete und durchmischte Stadtquartiere mit guter Luft und hohem Lärmschutz zu realisieren, sind planerische und städtebauliche Lösungen gefragt. Dabei spielen fachplanerische Instrumente eine Rolle (Luftreinhaltepläne, Lärmaktionsplanung), ebenso wie gesamtplanerische (Flächennutzung und Bebauungsplanung) und die ihnen zu Grunde liegenden städtebaulichen Überlegungen.

Mit der EU-Umgebungslärmrichtlinie gibt es einen gemeinsamen europäischen Ansatz zur Minderung der Lärmbelastung der Bevölkerung. Dabei werden nach EU-weit vergleichbaren Verfahren Lärmschwerpunkte durch eine umfangreiche, strategische Lärmkartierung ermittelt und auf deren Grundlage unter aktiver Mitwirkung der Öffentlichkeit Lärmaktionspläne aufgestellt. Ziel der Umgebungslärmrichtlinie ist es, die Bevölkerung von schädlichem Lärm zu entlasten, indem der vorhandene Lärm bekämpft und ruhige Gebiete erhalten werden. Diese Richtlinie wurde 2005 mit der Implementierung in das Bundes-Immissionsschutzgesetz in deutsches Recht überführt. Es verpflichtet die Kommunen, die Belastung der Menschen in den Ballungsräumen zu ermitteln und in Lärmkarten darzustellen. Auf der Grundlage dieser Lärmkarten ist ein Lärmaktionsplan (§ 47d BImSchG) zu erarbeiten, der Maßnahmen zur Lärmreduktion beschreibt und damit die Gesundheit der Bewohner schützen soll. Diese Lärmkarten und Lärmaktionspläne sind alle fünf Jahre zu überprüfen und fortzuschreiben. Bei der Erarbeitung der Lärmaktionspläne ist die Bevölkerung zu beteiligen. So fordert die Richtlinie in Artikel 8 Absatz 7 explizit aktive Mitwirkung anstatt passiver Beteiligung. Der Lärmaktionsplan stellt als Querschnittsinstrument Wirkungsbeziehungen zu verschiedenen Handlungsfeldern der Stadtentwicklung her.

Auch die Luftreinhalteplanung ist europäischen Ursprungs. Nach Art. 23 der EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG bzw. § 27 der 39. BImSchV sind Luftreinhaltepläne (im EU-Recht auch Luftqualitätspläne genannt) zu erstellen, wenn in bestimmten Gebieten

[7] *Die Zuständigkeiten für die Planaufstellung sind im Landesrecht der Bundesländer geregelt. Aufstellende Behörden sind die oberste Landesbehörde, eine obere Verwaltungsbehörde oder die Kommune selbst.*

oder Ballungsräumen die in der Richtlinie festgelegten Grenz- und Zielwerte überschritten werden. Luftreinhaltepläne müssen geeignete Maßnahmen zur Einhaltung dieser Werte aufzeigen, und dazu beitragen ihre Überschreitung »so kurz wie möglich« zu halten (vgl. § 47 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes). Zeigt sich, dass die Maßnahmen des Luftreinhalteplans voraussichtlich nicht ausreichen, um die Grenz- und Zielwerte einzuhalten, erfolgt eine Planfortschreibung. In Deutschland wurden in den vergangenen Jahren für 161 Städte und Kommunen Luftreinhaltepläne erstellt und fortgeschrieben (Umweltbundesamt 2019c)[7].

Neben diesen fachplanerischen Instrumenten spielen Lärmminderung und Luftqualität auch in der Stadtplanung eine zentrale Rolle: Die saubere Luft ist bis weit in die Geschichte zurück ein zentrales Motiv für städtebauliche Strukturen. Aus den Windrichtungen zum Zweck der Durchlüftung wurden bereits in der Antike Grundzüge für bauliche Strukturen abgeleitet (Wienke 2013). Im 20. Jahrhundert prägte die Charta von Athen mit ihrem Leitbild eines an hygienischen, gesunden Lebensbedingungen ausgerichteten Städtebaus (»Licht, Luft, Sonne«) und als »gegliederte und aufgelockerte Stadt« die Stadtentwicklung in Europa nachhaltig (Kuder 2001: 169f.). In der Folge entstanden viele Zeilen- und Reihenhausstrukturen, optimiert hinsichtlich Durchlüftung, Besonnung und Durchgrünung.

Ein lärmmindernder Städtebau hingegen stellt andere Anforderungen. Hier ist zum einen die räumliche Gliederung der Nutzungen nach den Baugebieten der BauNVO (§ 1 Abs. 2 bis 9 BauNVO) zu nennen, sowie die Planung von »Pufferzonen«, bspw. durch nicht-störendes Gewerbe. Auch die zeitliche Staffelung von Nutzungen kann Lärmkonflikte entschärfen. Zum anderen sind lärmmindernde städtebauliche Strukturen von Bedeutung, wie geschlossene Fassaden als Lärmabschirmung für dahinterliegende Nutzungen, Blockbebauungen und lärmabschirmende Gebäuderiegel, die auch an lärmbelasteten Standorten ruhige Gebäuderückseiten und Wohnaußenbereiche (bspw. Innenhöfe) ermöglichen. Dazu gehört auch eine Grundrissgestaltung, die bspw. Schlafräume der ruhigen Gebäudeseite zuordnet. Weitere Maßnahmen sind Lärmschutzwände oder -wälle, sowie bauliche Maßnahmen am Gebäude, wie bspw. Balkon- und Terrassenverglasungen oder Schallschutzfenster. Zentral sind zudem die Schnittstellen zur Verkehrsplanung und die Einrichtung autofreier oder zumindest stellplatzreduzierter Wohngebiete.

Ein Beispiel ist eine aktuelle Wohnbauentwicklung in München am Candidplatz, unmittelbar am Mittleren Ring. Hier besteht eine in den 1950er-Jahren im Sinne des aufgelockerten Städtebaus errichtete Bebauung, ohne geschlossene Fassade und mit zur Straßenseite abgestuften Gebäudehöhen. Im Rahmen einer Nachverdichtung wird diese Bebauung deutlich erhöht und durch einen lärmabschirmenden Gebäuderiegel geschlossen, der aber zugleich durch transparente Gebäudeteile die Belichtung und Beziehung zur Straßenseite (zugleich Südseite) vorsieht (Stadtportal München 2017).

Während für den lärmmindernden Städtebau damit geschlossene städtebauliche Strukturen Vorteile bringen, können diese aus der Perspektive der sauberen Luft problematisch sein, da eine Durchlüftung verhindert wird. Die bspw. bei Blockbebauung entstehenden kleinräumigen Frei- und Grünräume in Höfen haben zudem auf die Luftbelastung nur eine geringe reduzierende Wirkung, denn ihr Potenzial zur Bindung von Schadstoffen ist gering. Während sich die städtebaulichen Lösungen zur Lärmminderung stark auf das Quartier konzentrieren, ist für die saubere Luft – wie auch für Klimaanpassung – das Verhältnis von baulichen Strukturen und Freiraumstrukturen auch im gesamtstädtischen Maßstab (bspw. Frischluftschneisen, größere Freiflächen zur nächtlichen Auskühlung) entscheidend. Auf den hier bestehenden Zielkonflikt muss eine auf Lärmminderung und saubere Luft ausgerichtete Planung reagieren. Auch im o.g. Beispiel München Candidplatz spiegelt sich dieser Zielkonflikt wider. Ein umfangreiches Mobilitätskonzept mit Möglichkeiten der Elektro-PkW Nutzung, Stärkung des öffentlichen Nahverkehrs und guten Voraussetzungen für die Nutzung von Fahrrädern ist daher Teil des Konzepts. Maßnahmen, die im Quartier ansetzen, sind hilfreiche Bausteine. Sie müssen aber durch stadtweite Maßnahmen für bessere Luft flankiert werden, bspw. im Rahmen der Luftreinhalteplanung, wie es sie auch in München gibt. Da sich der Konflikt zwischen Lärmminderung und sauberer Luft allein städtebaulich nicht vollständig lösen lässt, sind Maßnahmen zur Schadstoffreduktion an der Quelle nach wie vor eine wichtige Forderung.

Fazit

Vor dem Hintergrund der zunehmenden baulichen Verdichtung und Nutzungsmischung in den Städten ist die Frage der Lärmminderung und Verbesserung der Luft von hoher Relevanz. An der Lärmbelastung und der Luftqualität werden Nutzungskonflikte deutlich, bspw. zwischen Verkehr und Wohnen oder Gewerbe und Wohnen. Auch zwischen den Zielen der Lärmminderung und der Verbesserung der Luft können sich Zielkonflikte ergeben, da städtebauliche Strukturen mit lärmabschirmender Bebauung zugleich negative Effekte auf die Durchlüftung haben. Die Stadtplanung ist aufgefordert, diese im Rahmen der fachplanerischen,

gesamtplanerischen und städtebaulichen Möglichkeiten so weit wie möglich zu reduzieren mit dem Ziel beiden zentralen Belangen für Umwelt- und Lebensqualität gerecht zu werden. Aber auch mit kreativen städtebaulichen Lösungen werden sich diese Zielkonflikte nicht vollständig auflösen lassen. Die Bedeutung der Schadstoff- und Lärmminderung an der Quelle ist bekannt, aber bleibt vor diesem Hintergrund umwelt- und stadtentwicklungspolitisch zentral. Notwendig ist eine »Verkehrswende«, die den MIV in Städten deutlich reduziert. Damit würde zugleich Raum frei für mehr Wohnnutzung und Grün in Städten, die im Zuge der hohen Nachfrage nach Flächen in der Stadt und der Nutzungskonkurrenzen in den zunehmend verdichteten Städten dringend gebraucht wird.

Literatur

BMUB (2015): Neues Zusammenleben in der Stadt, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nationale_Stadtentwicklung/zusammenleben_staedte_bf.pdf.

HEILSHORN T. (2009): Schutz vor gewerblichen Immissionen durch passiven Schallschutz, Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ) 2009/3, 137-143.

KUDER T. (2001): Städtebauliche Leitbilder – Begriff, Inhalt, Funktionen und Entwicklung, gezeigt am Beispiel der Funktionstrennung und -mischung. Dissertation TU Berlin. *http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/y/2003/tu-berlin/kuder_thomas.pdf.*

STÜER B. (2015): Bau- und Fachplanungsrecht. 5. Auflage 2015, Rn. 8116.

SUPPLIES T., F. MOTHES, R. GUSCHEL, K. FRESE & M. LIEBAU. (2018): Mach's leiser! Das Handbuch Lärmminderung für Kommunen leichtgemacht, Ökolöwe Umweltbund Leipzig e.V. – Handreichung für kommunale Lärmaktionsplanung, Hrsg. Umweltbundesamt. *http://www.machsleiser.de/handbuch-zur-laermaktionsplanung.*

STADTPORTAL MÜNCHEN (2017): Wohnen am Candidplatz. *https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Stadtplanung-und-Bauordnung/Stadt-und-Bebauungsplanung/Wettbewerbe/Candidplatz.html (*abgerufen am 20.09.2019).

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2017): Stadt für Morgen, *https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-stadt-fuer-morgen-umweltschonend-mobil-laermarm*.

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2018): Neun Antworten und Fragen zum Diesel. *https://www.umweltbundesamt.de/themen/neun-fragen-antworten-diesel* (abgerufen am 20.09.2019).

UMWETBUNDESAMT (UBA) (2019a): Luftqualität 2018, Vorläufige Auswertung: *https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2018*.

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2019b): Schwerpunkt »Gesunde Luft« 1/2019 (Juni 2019). *https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schwerpunkt-1-2019-gesunde-luft.*

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2019c): Liste der Luftreinhalte- und Aktionspläne in Deutschland: *http://gis.uba.de/website/umweltzonen/lrp.php.*

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2019d): Gegenüberstellung der in Europa geltenden Grenz-/Zielwerte und der Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Zusammenstellung UBA, Stand 08.01.2019). *https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3593/dokumente/eu_vs_who_ueberarbeitet_mit_kanzerogenen_final.pdf.*

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2019e): Lärmbelästigung durch mehrere Lärmquellen. *https://www.umweltbundesamt.de/bild/laermbelaestigung-durch-mehrere-laermquellen* (abgerufen am 30.09.2019).

UMWELTBUNDESTAMT (UBA) (2019f): Lärmbelästigung in Deutschland (in%). *https://www.umweltbundesamt.de/bild/strassenlaerm-wird-von-den-deutschen-als-groesste* (abgerufen am 30.09.2019).

WHO (2001): Air quality guidelines for Europe. *http://www.euro.who.int/de/publications/abstracts/air-quality-guidelines-for-europe.*

WHO (2006): Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. *http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/pre2009/air-quality-guidelines.-global-update-2005.-particulate-matter,-ozone,-nitrogen-dioxide-and-sulfur-dioxide.*

WHO Europa (2018): Leitlinien für Umgebungslärm für die Europäische Region. *http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2018/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018.*

WIENKE U. (2013): Geschichte des klimagerechten Bauens. *http://klimagerechtesbauen.blogspot.com/2013/09/mittelmeerklima-antikes-rom-romischer.html.*

Gesetzestexte

Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/, in der Fassung vom 08. April 2019

EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=DE, in der Fassung vom 21. Mai 2008

Geruchsimmissions-Richtlinie – GIRL, Versiono1/2009 Vorschriftensammlung der Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg, http://gaa.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16507/6_1.pdf, in der Fassung vom 29. Februar 2008,

Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm, in der Fassung vom 25. Juni 2002

39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (39. BImSchV): https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/, in der Fassung vom 02. August 2010

Kontakt:

Dr. Susanne Schubert
Annett Steindorf
Johanna Appelhans
Umweltbundesamt (UBA) - Dessau-Roßlau
Susanne.Schubert@uba.de

Schubert S., A. Steindorf & J. Appelhans (2019): Verbesserung der Luft und Verringerung des Lärms in Städten. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 240-246. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.35.

6.8 Klimaneutralität im Gebäudebestand bis 2050 – Wie geht das?

Burkhard Schulze-Darup

Im Gebäudebestand wissen wir seit vielen Jahren, wie wir die Klimaziele bis 2050 umsetzen können. Techniken für Effizienz und Erneuerbare sind marktverfügbar. Neubau und Sanierung müssen auf der Effizienzseite im Best Practice Standard, also nah an der Passivhausqualität umgesetzt werden. Zahlreiche umgesetzte Projekte – gleich ob Wohnungs- oder Gewerbebau, ob Einzelgebäude oder Quartiere – zeigen, wie zukunftsfähiges Bauen aussieht. Diese zeichnen sich nicht nur durch einen sehr niedrigen Heizwärmebedarf aus, sondern auch durch eine niedrige Heizlast, die sehr kostengünstige Heizsysteme ermöglicht und Grundlagen für eine wirtschaftliche Versorgung mit erneuerbaren Energien darstellt, die umfassend in die Siedlungsstrukturen integriert werden müssen. Der Energiebedarf für Warmwasserbereitung liegt bei effizienten Gebäuden höher als der Bedarf fürs Heizen. Durch die Umstellung von der brennstoffbasierten fossilen Energieversorgung auf die strombasierte Bereitstellung erneuerbarer Energie ergeben sich viele Chancen für einfache Lösungen. Der Strombedarf für Haushalt bzw. die gewerblichen Nutzungen ist als wesentlicher Faktor in die Versorgungsstrategien ebenso einzubeziehen wie die Ladeinfrastruktur für E-Mobilität. Dabei können Lösungen für Quartiere bzw. Regionen mit einem hohen regionalen Autarkiegrad die Kosten der Energiewende für das überregionale Netz deutlich senken.

Climate neutrality in building stock by 2050 - How to manage it ?: *Since several years we know how to implement the climate goals by 2050 in the building stock. Techniques for efficiency and renewables are available on the market. New construction and renovation must work on the efficiency side in the best practice standard, i.e. close to the passive house quality. Numerous implemented projects - whether residential or commercial construction, whether individual buildings or quarters - show what future-proof constructions look like. These are characterized not only by a very low heating demand, but also a low heating load, which enables very cost-effective heating systems and forms the basis for an economic supply of renewable energies, which must be fully integrated into the settlement structures. The energy demand for water heating is higher in efficient buildings than the need for heating. Switching from fuel-based fossil energy supply to electricity-based renewable energy provision creates many opportunities for simple solutions. Electricity needs for households and commercial uses are to be included as essential factors in the supply strategies as well as the charging infrastructure for e-mobility. Solutions for quarters or regions with a high degree of regional autonomy can significantly reduce the costs of the energy transition for the supraregional network.*



Neue Mitte Frankfurt zwischen Dom und Römer in Passivhausqualität. Quelle: Schulze Darup

Der Immobilienbereich wird durch langfristige Investitionsentscheidungen geprägt. Einerseits müssen wir deshalb in unseren Entscheidungen weit vorausschauen und in der daraus resultierenden Konsequenz heute bei jedem Neubau und jeder Sanierung die Standards umsetzen, die auch in zwei bis drei Jahrzehnten noch aktuell sein mögen. Im Gegensatz zu anderen Sektoren verfügen wir im Gebäudebereich über ausgereifte Techniken und Komponenten, um zukunftsfähige Lösungen umzusetzen und damit die definierten Klimaziele zu erreichen. Doch welcher weiteren Entwicklungen bedarf es, um für diese Zielsetzungen die Rahmenbedingungen und Leitplanken zu schaffen? Wie erreichen wir mit einer Ausgewogenheit zwischen Effizienz und Erneuerbaren kostenoptimierte Lösungen? Bei den Effizienzkomponenten haben wir mit Best Practice Techniken wie dem Passivhaus die notwendigen Standards erreicht. Es geht jetzt darum, einfacher und nachhaltiger zu werden. Das entlastet die Planung und kommt der Wirtschaftlichkeit spürbar entgegen. Die Gebäude- und Versorgungstechnik dagegen wird grundsätzlich neu ausgerichtet werden müssen, um den Anforderungen der Energiewende und den Besonderheiten der erneuerbaren Techniken gerecht zu werden.

Effizienzkomponenten für die Gebäudehülle

Für die Bauteile der Gebäudehülle wurden in den letzten Jahren viele konstruktiv und gestalterisch hochwertige Lösungen mit hoher Energieeffizienz entwickelt, die zudem das Baubudget längst nicht mehr über Gebühr zusätzlich belasten. Was die Dämmung der Außenwände angeht, liegen die Neubau-Mehrkosten gegenüber dem EnEV-Standard bei rund 12 bis 30 Euro pro Quadratmeter Wohnfläche, um dem Passivhausniveau zu entsprechen. Bei der Dachdämmung hängen die Mehrkosten von der Geschossigkeit ab, weshalb hier die Mehrinvestitionen zwischen 5 und 15 €/m² Wohnfläche (WF) liegen können. Das Gleiche gilt für die Kellerdecken- oder Bodenplattendämmung mit 6 bis 18 €/m² WF (Ecofys & Schulze Darup 2014).

Passivhaus-Fenster kosteten vor 20 Jahren nahezu das Dreifache von Standardfenstern. Diese Kosten sind in den letzten fünfzehn Jahren dramatisch gesunken. Wenn bei der Planung zudem die Gestaltungsspielräume hinsichtlich des Fensterflächenanteils und der Wirtschaftlichkeit der Fensterformate und Konstruktionen genutzt werden, liegen die Mehrinvestitionen nur noch bei 5 bis 15 €/m² WF. Die Qualitätssicherung für Wärmebrücken und Luftdichtheit erfordert bei erfahrenen Planern kaum Mehraufwendungen, jedoch können die Zusatzkosten für unerfahrene Passivhausplaner am Anfang der Lernkurve durchaus bei 30 €/m² WF liegen.

Jedes neue und sanierte Bauteil sollte eine Nutzungsdauer von möglichst 60 Jahren aufweisen. Nur dann lässt sich behaupten, dass es sich um eine nachhaltige und zukunftsfähige Konstruktion handelt. Diese Sichtweise impliziert, dass die damit verbundenen Effizienzstandards ebenso zukunftsfähig sind. Wenn wir also neu bauen oder sanieren, gilt es, jedes Bauteil energetisch so gut wie möglich auszuführen. Sonst ist es eine vertane Chance. Mittelmäßige Standards bilden ein Dilemma: sie benötigen vor Ablauf der Nutzungsdauer eine energetische Ertüchtigung, die auf keinen Fall unter wirtschaftlich sinnvollen Rahmenbedingungen möglich ist.

Heiztechnik – einfach & erneuerbar

Die vor uns stehende Energiewende stellt völlig neue Anforderungen an die Versorgung von Gebäuden und ganzer Stadtteile. Der Übergang von fossilen Energieträgern zu regenerativer, vorrangig elektrischer Versorgung bedingt die Zusammenführung erneuerbare Wärme mit regenerativer Stromgewinnung. Vereinfacht ausgedrückt: Strombasierte Techniken in Verbindung mit einer hohen Arbeitszahl, z. B. durch Wärmepumpen, reihen sich ganz vorne in der Prioritätenliste ein. Für den Paradigmenwechsel bei der Heiztechnik sprechen jedoch noch ganz andere Gründe: Wenn selbst an kalten und trüben Wintertagen rechnerisch 15 bis 20 Teelichter ausreichen, um in einem hocheffizienten Einfamilienhaus kuschelig warm zu wohnen, steht außer Zweifel, dass die Heiztechnik verschlankt werden kann und mit deutlich niedrigerer Leistung als bisher auskommt.

Außerdem gleicht sich die wohnungsinterne Energiedichte für Heizen, Warmwasser und Haushaltsgeräte zunehmend an und ermöglicht völlig neue synergetische Versorgungssysteme, die investitions- und betriebskostenmäßig gegenüber der bisherigen Gebäudetechnik ein bedeutendes Einsparpotenzial bergen. Und so ganz nebenbei lassen sich auf diese Weise die bisherigen hohen Verluste bei der Warmwasserbereitung deutlich senken. Bei der Heizung sind mit vereinfachten Systemlösungen 15 bis über 40 €/m² WF einzusparen. Das gilt insbesondere für Wärmepumpenkonzepte, bei denen neben dem Aggregat sowohl primärseitig als auch auf der Heizseite jeweils deutlich kleinere Lösungen als für den EnEV/GEG-Standard umgesetzt werden können. Es gilt einen Wettbewerb in der Heizungsbranche zu initiieren, damit auf diesem wichtigen Feld zeitnah einfache und innovative Konzepte auf den Markt kommen.

Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung – auf dem Weg zur Wirtschaftlichkeit

Lüftungstechnik reduziert mit optimierter Wärmerückgewinnung den Heizwärmebedarf um 20 bis 30 kWh/(m²a). Sie wird als Komfortlüftung bezeichnet, weil sie verbesserte Raumluft-hygiene in Verbindung mit hoher Behaglichkeit bringt. Bisherigen Kosten von 50 bis über 100 €/m²WF stehen heute weitaus günstigere und damit auch wirtschaftliche Lösungen ab rund 35 €/m² WF gegenüber. Das gilt insbesondere, wenn man davon jene 15 bis 25 €/m² WF abzieht, die es für eine Abluftanlage zum Erreichen der Raumlufthygiene nach DIN 1946-6 ohnehin braucht. Trotzdem müssen Komfortlüftungssysteme in den nächsten Jahren einfacher und kostengünstiger werden, um die Akzeptanz kurzfristig zu fördern. Die Hersteller der Lüftungssysteme müssen zudem darauf achten, die Wartungskosten möglichst niedrig zu halten (Schulze Darup 2018).

Kosten & Wirtschaftlichkeit

Bauen ist eine gesellschaftliche Aufgabe mit immer neuen rechtlichen, sozialen und politischen Rahmenbedingungen. Zukunftsfähige Gebäude lassen sich nur dann umsetzen, wenn Funktionalität und Gestaltung, Nachhaltigkeitsanforderungen und Baustandards interdisziplinär und optimal aufeinander abgestimmt werden. Es gilt diese Anforderungen regelmäßig zu hinterfragen und einen offensiven Umgang mit ökonomischen Anforderungen zu pflegen. Die Abbildungen zeigen die Mehrinvestitionen gegenüber dem aktuellen EnEV-2016-Standard für KfW-Standards und Passivhaus-Gebäude unterschiedlicher Optimierungsstufen. Etwa 70 Prozent der Planer können Werte gemäß *Abb. 6.8-1* realisieren (Schulze Darup 2018), Planer mit Erfahrung im energieeffizienten Bauen erreichen durchweg Werte gemäß *Abb. 6.8-2*.

Untersuchungen zeigen die hohe Anzahl von kostentreibenden Faktoren (BMUB 2015, Walberg et al. 2015). Derzeit sind es vor allem die Faktoren, die sich aus der Marktsituation, der Vergabeart und vor allem der Qualität der Planung ergeben (*Abb. 6.8-3*). Im Vergleich dazu liegen die energetisch bedingten Mehrinvestitionen für Effizienzstandards vergleichsweise niedrig. Erfahrene Planer mit Willen zur Kostenoptimierung bieten beste Voraussetzungen für wirtschaftliches Bauen. Angesichts dieser Gegenüberstellung verwundert es, dass ausgerechnet die eher geringen Mehrinvestitionen für die energetischen Maßnahmen so breit und emotional diskutiert werden. Dabei ist dies der einzige Posten, der zu einer Refinanzierung durch die Energieeinsparung beiträgt. Das gilt insbesondere im Zusammenhang mit der Förderung durch das KfW-Programm »Energieeffizient Bauen«, die hohe Effizienzstandards für Bauherren aus wirtschaftlicher Sicht sehr attraktiv macht. Zusätzlich können regionale und kommunale Förderungen ergänzend das Budget entlasten.

Es lässt sich sehr gut beobachten, wie seit Jahren eine Parallelverschiebung der Förderstandards und des EnEV-Anforderungsniveaus stattgefunden hat (*Abb. 6.8-4*): Durch die Förderung werden neue Techniken in den Markt eingeführt, und es findet eine Kostendegression statt, wenn innovative Komponenten in die Mainstreamfertigung gehen. Eine Analyse der Kostenentwicklung für Effizienzkomponenten kommt zu dem Ergebnis, dass hocheffiziente Bauteile zunächst deutlich erhöhte Kosten aufweisen. Sobald sie zum üblichen Standard werden, passen sich die Preise sehr deutlich den bisherigen Standardkonstruktionen an (Ecofys & Schulze Darup 2014).

Zahlreiche erfahrene Planer weisen gleichermaßen darauf hin, dass bei einem Planungsprozess mit dem Ziel hoher Energieeffizienz oftmals auch ein kostenoptimiertes Entwurfskonzept einhergeht. So verringert beispielsweise ein günstiges Verhältnis der **A**ußenhülle zum **V**olumen (A/V-Verhältnis) auch die Baukosten, indem komplexe oder geometrisch komplizierte Hüllflächen vermieden werden können. Insofern verwundert es nicht, dass bei der »Analyse des Einflusses der energetischen Standards auf die Baukosten im öffentlich geförderten Wohnungsbau in Hamburg« für KfW EH 40 und Passivhaus-Standard im Mittel keine Kostenerhöhungen im Vergleich zu Standardgebäuden nachgewiesen werden konnten (F+B 2016) sondern Gebäude im Passivhaus-Standard im Mittel günstiger lagen als EnEV-Gebäude. Zum gleichen Ergebnis kommen mehrere weitere Studien zum »Kostenvergleich unterschiedlicher Baustandards Wohngebäude« des Amtes für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie der Stadt Heidelberg (Bermich 2014), in der 154 Objekte der BKI Datenbank 2009 bis 2013 ausgewertet wurden. Im Ergebnis liegen die mittleren Baukosten (Kostengruppen 300/400 inkl. MWSt.) bei 2.361 € pro m² Wohnfläche für Passivhäuser gegenüber 2.554 €/m² für Gebäude im EnEV-Standard. In gleicher Quelle wird nachgewiesen, dass die mittleren Kosten für die Passivhäuser der Bahnstadt Heidelberg bei 1.875 €/m² lagen. Die Spreizung zwischen dem günstigsten und teuersten Gebäude betrug allerdings auch dort 1.096 €/m².

Aus diesen Zahlen lässt sich vor allem der Schluss ziehen, dass Bauherren gut beraten sind, wenn sie Planer beauftragen, die Erfahrung mit hocheffizienten

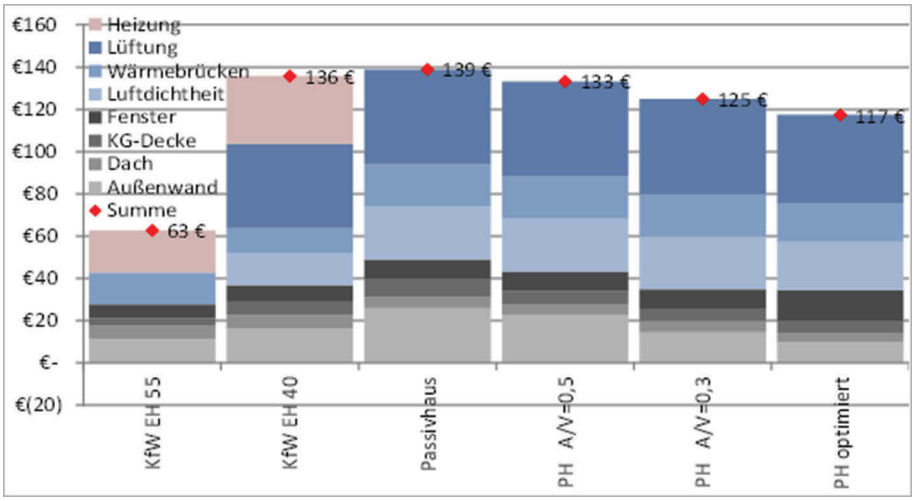


Abb. 6.8-1: *Mehrinvestitionen gegenüber dem aktuellen EnEV 2016-Standard für KfW-Standards und Passivhaus-Gebäude unterschiedlicher Optimierungsstufen. Diese Mehrinvestitionen können ca. 70 Prozent der Planer realisieren (Schulze Darup 2018a).*

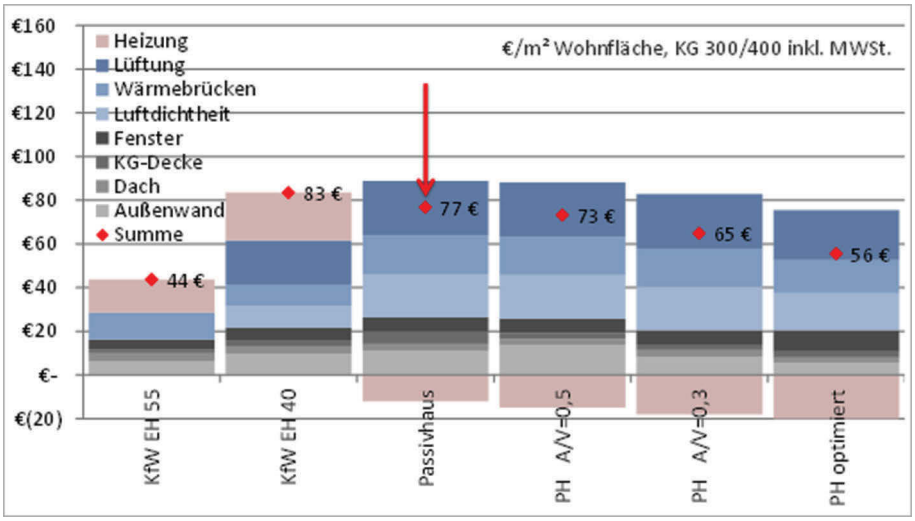


Abb. 6.8-2: *Mehrinvestitionen wie in Abb. 6.8-1, jedoch bei optimierter Planung, die etwa 30 Prozent der Planer realisieren können. Der rote Pfeil beim Passivhaus zeigt, dass die Gesamtkosten durch die Einsparungen bei der Heizung günstiger ausfallen (Schulze Darup 2018a).*

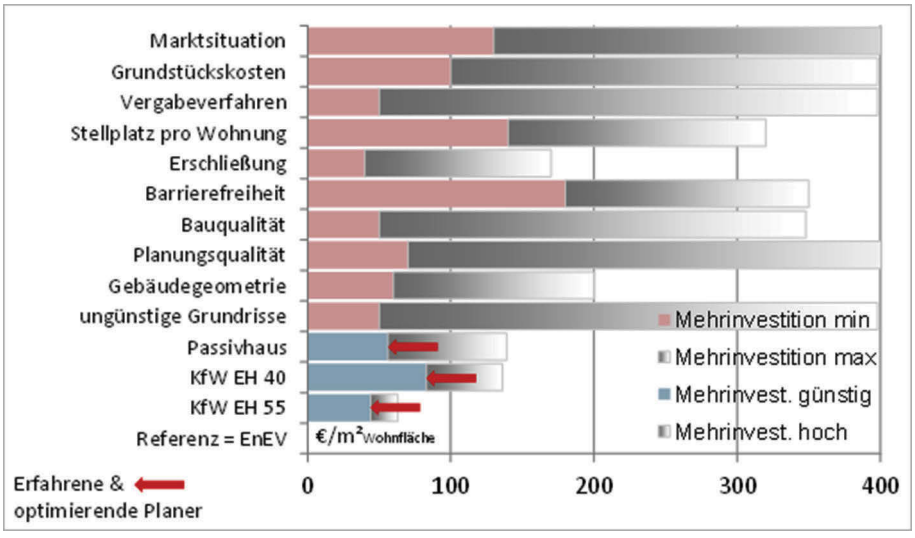


Abb. 6.8-3: *Charakteristische Kostengrößen für relevante Kostentreiber. Im Vergleich zu Markt- und planungsbedingten Kosten liegen die Mehrinvestitionen für erhöhte Energiestandards eher niedrig. Erfasst sind die Werte der beiden vorausgehenden Abb. 6.8-1 und -2 (Schulze Darup 2018a).*

Gebäuden aufweisen. Ganz offensichtlich gibt es einen Zusammenhang zwischen Effizienzdenken beim Energiesparen und kosteneffizienter Gebäudeplanung. Zukunftsfähige Baulösungen punkten hinsichtlich Komfort und Lebenszyklusbetrachtung gleichermaßen, weshalb sie eine werthaltige Investition darstellen. Langfristig betrachtet profitieren Bauherren davon, da ein übliches, den bisherigen Anforderungen entsprechendes Gebäude in gut 20 Jahren energetisch zu ertüchtigen sein wird, während ein hocheffizienter Energiestandard auch langfristig mit den Zielen der Energiewende kompatibel ist. Erschlagend unparteiisch weisen Kostendaten des Statistischen Bundesamtes zu den von Bauherren und Architekten veranschlagten Baukosten nach DIN 276 zum Zeitpunkt des Bauantrags nach, dass die Kostenentwicklung nicht durch die zahlreichen Stufen der Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnung geprägt wurde, sondern durch andere Faktoren (DESTATIS 2015).

Förderung allein wird nicht reichen – Ordnungsrecht muss sein

Es stellt sich daher die Frage: Welche Rahmenbedingungen braucht es, um in den nächsten Jahren hocheffiziente Standards zielgerichtet in der Breite im Markt zu etablieren? Erzielen wir die erforderlichen Klimaschutzstandards durch verschärftes Ordnungsrecht, durch deutlich erhöhte Förderung oder den Mix von beidem? Oder provokativ ausgedrückt: Wie lange müssen wir für sukzessive wirtschaftlicher erreichbare Effizienzstandards Steuergelder bemühen? Brauchen wir Dauerförderung oder werden die notwendigen Effizienzstandards schnell erwachsen? Sind unsere Politiker und Entscheider mutig genug, Leitplanken mit sozialer Ausgewogenheit zu schaffen oder wird der Bundesrechnungshof den Anstoß dazu geben müssen, Steuermittel ausgewogen einzusetzen. Und schließlich: wie kann ein Klimaschutzfond zielgerichtet im Sinn einer CO_2-Bepreisung genutzt werden, dabei zugleich Anreize ermöglichen und für einen sozial gerechten Ausgleich sorgen?

Wir können optimistisch sein: vor der EnEV-Anpassung 2016 galt die Prognose, dass in der Breite kaum mehr als der KfW EH 70 Standard erreichbar sei. Der Markt belehrte uns eines Besseren: Während im Jahr 2015 nur 26.000 Wohneinheiten im Standard KfW EH 55 gebaut wurden, waren es 2016 bereits 93.000 geförderte Wohnungen. Tendenz stark steigend. Obendrein erhöhten sich nach Angaben der KfW die Standards KfW EH 40 und KfW EH 40 Plus von 8.200 auf 19.200 Einheiten (vgl. dazu *Abbildung 6.8.4*).

Angesichts der sich verbessernden Effizienz-Komponenten ist absehbar, dass ein passivhaus-äquivalenter Standard im Jahr 2021 marktgängig sein wird. Eine mögliche Option könnte die verbindliche Festsetzung solch eines Standards in Verbindung mit einer Förderung sein, die in den Folgejahren geplant degressiv verläuft. Ergänzend kann dabei aus der erfolgreichen KfW Effizienzhaus 55 Förderung gelernt werden. Vielleicht lautet die entscheidende Frage, wie das Förderverfahren und insbesondere die Berechnungsmodalitäten vereinfacht werden können. Ein wichtiger Aspekt ist dabei ein möglichst einfach gefasstes und dadurch schnell akzeptiertes und etabliertes Gebäudeenergiegesetz (GEG), getreu dem Motto: »GEG auf drei Seiten!« Vielleicht bietet sich an dieser Stelle die Chance für einen ambitionierten Politikansatz, die Lücke zwischen Anspruch und Wirklichkeit in der Klimapolitik zu schließen.

Angesichts des Auseinanderdriftens des hochpreisigen Immobiliensektors und der erforderlichen Wohnungen im unteren Kostensegment muss zudem dringend hinterfragt werden, wie im Wohnungssektor zusätzlich zur energetischen KfW-Förderung eine komplementäre Unterstützung sozialer Aspekte optimal gestaltet werden kann unter Beachtung regionaler Marktunterschiede und berechtigter Anliegen der Wohnungswirtschaft.

Nachhaltigkeit & Lebenszyklusbetrachtung

Mit sinkendem Energiebedarf für das Betreiben von Gebäuden rückt der Energiebedarf für die Errichtung und den späteren Abriss sowie die Entsorgung vermehrt in den Blickwinkel. Es gilt die gesamte Produktlinie der Materialien zu betrachten und die daraus resultierenden Belastungen des »ökologischen Rucksacks« zu minimieren. Es ist Aufgabe der Planer, gesamtheitliche Nachhaltigkeitsbetrachtungen bei der Auswahl der Konstruktionen und Materialien anzustellen. Dazu bedarf es praxisgerechter Werkzeuge. Ein sehr sinnvoller Ansatz besteht in der Lebenszyklusanalyse nach eLCA des BBSR (2018). Es wird zukünftig möglich sein, die Lebenszyklusanalyse im Zuge der energetischen Berechnung oder aus der CAD-Planung als zusätzlichen Kennwert nahezu ohne Mehraufwand zu generieren. Während bei Bestandsgebäuden die Betriebsaufwendungen die deutlich dominante Größe darstellen, erreicht bei einem hocheffizienten Passivhaus der Aufwand für die Graue Energie einen Anteil von 20 bis über 30 %, wenn sie auf die Nutzungszeit der Bauteile abgeschrieben wird.

Wir sollten nicht davon ausgehen, dass Gebäude »ihre« eingebaute Energie im Laufe ihres Bestehens durch erneuerbare Energien wieder einfahren müssen. Ebenso wenig kann unser Baugeschehen künftig allein auf der Basis nachwachsender Materialien erfolgen.

Also ist es Aufgabe der Bauindustrie, sukzessive ressourceneffiziente Produkte mit möglichst geringer Belastung der Umwelt zu entwickeln und für deren Herstellung bis spätestens 2050 ausschließlich regenerative Energien und möglichst weitreichend erneuerbare oder recycelte Ressourcen zu nutzen.

Ein wichtiger Blickwinkel – Erneuerbare Primärenergie (PER)

Die bisherige fossile Energieversorgung basiert auf Brennstoffen. Entsprechend einfach lässt sich der Weg von der Energiequelle zum Ort der Nutzung mit einer Kennzahl darstellen. Für die wesentlichen Brennstoffe Öl und Gas beträgt der Primärenergiefaktor 1,1. Dagegen wird Strom über den Umweg des Kraftwerks bereitgestellt, was einen erhöhten Primärenergiekennwert zur Folge hat, der in den letzten Jahren aufgrund besserer Kraftwerkseffizienz und der erneuerbaren Anteile von 3,0 auf 1,8 gesunken ist. Der Primärenergiekennwert fossiler Energieträger wird sich dynamisch weiter verändern und ist nicht besonders gut geeignet, zukünftige Entwicklungen zu beschreiben oder gar zu lenken.

Die künftige erneuerbare Versorgung basiert auf der Primärseite zu überwiegenden Teilen auf Strom, der als Primärstrom vor allem aus Windkraftanlagen und Photovoltaik stammt. Direkt genutzter Wind- und Sonnenstrom weist einen erneuerbaren Primärenergiefaktor (PER-Faktor) von 1,0 auf und ist zunehmend sehr kostengünstig verfügbar. Erneuerbares Gas muss dagegen aufwendig mittels Elektrolyse erzeugt werden, was sich in einem erhöhten PER-Wert von z. B. 1,75 niederschlägt (Passivhaus Institut Darmstadt 2017). Bei Rückverstromung betragen die Gestehungskosten pro kWh derzeit etwa 0,25 bis 0,30 €/kWh und im Jahr 2040 immer noch 0,15 bis 0,09 €/kWh. Im Vergleich dazu liegen die Werte für erneuerbaren Strom aus Wind und PV derzeit bei 0,06 bis 0,12 €/kWh und im Jahr 2040 bei 0,03 bis 0,07 €/kWh.

Daraus ergeben sich grundlegend neue Konstellationen für die Gebäude- und Versorgungstechnik. Es stehen bei der Infrastruktur grundlegende Entscheidungen an, die auf Jahrzehnte hinaus Gültigkeit haben werden. Wir benötigen zeitnah die Kriterien für die Wärmewende mit Regularien der 2030/40er Jahre. Es ist offensichtlich, dass im Wärmebereich die effizienteste verfügbare Gebäudetechnik aktuell vor allem mit der Wärmepumpentechnik gegeben ist. Kann direkt erzeugter erneuerbarer Strom – im Idealfall als Eigenstromnutzung aus dem eigenen Gebäude oder Quartier – mittels Arbeitszahlen von 3 bis 6 in Wärme umgewandelt werden, ist eine sehr hohe erneuerbare Versorgungseffizienz zu sehr günstigen Kosten gegeben, die pro Kilowattstunde Wärmeenergie derzeit bei 0,03 bis 0,05 Euro liegt. Spannend ist aber vor allem die Frage, wie die Versorgung zu Zeiten ohne Sonne und Wind funktioniert, also zu Zeiten der Dunkelflaute im Winter. Kann eine Technik wie Power to Gas (PtG) die hohen Erwartungen erfüllen? Es ist noch nicht absehbar, wie sich diese Technik mittelfristig mikro- und makroökonomisch darstellt und ob die Gasnutzung dezentral über die vorhandenen Netze oder vorrangig zentral durch GuD-Module erfolgt. Sicher ist jedoch, dass ein hoher PtG-Anteil zu deutlichen Kostensteigerungen bei der Energieversorgung führen würde. Ziel muss also ein System sein, dass Versorgungssicherheit mit einem möglichst geringen Anteil an PtG-Techniken gewährleistet (Schulze Darup 2018).

Vor diesem Hintergrund bleibt die Frage, welcher Gebäudestandard mit den zukünftigen Systemen am besten kompatibel ist. Die Antwort ist extrem einfach: je effizienter die Gebäude, desto niedriger liegt die winterliche Spitzenlast und desto kostengünstiger fallen regionale und nationale Versorgungsstrukturen aus. Das ist ein ziemlich gewichtiges Argument für hocheffiziente Gebäudestandards. Ein wesentliches Qualitätskriterium für Gebäude wird die minimierte Lastspitze zu Zeiten der Dunkelflaute sein, eine Art Netzfreundlichkeitsindikator, um den zweiten redundanten Kraftwerkspark zu minimieren, der als teure Reserve für die wenigen hundert Stunden im Winter bereitstehen muss, in denen weder Sonne noch Wind zur Verfügung stehen.

Wenn es also um die Gestaltung von erneuerbaren Versorgungsstrategien geht, ist es anachronistisch, allein auf Analysen zur Entwicklung der fossilen Primärenergie oder CO_2-Reduktion zu setzen. Vielmehr muss zukünftig vorrangig in der Kategorie der erneuerbaren Primärenergie gedacht werden. Nur dann können gestaltende Aussagen zu den Ressourcen der Zukunft gemacht und unnötige Verluste innerhalb des regenerativen Versorgungssystems minimiert werden.

Geopolitische Aspekte

Der Prozess, fossile Energieträger überflüssig zu machen, ist bereits heute unumkehrbar. Wenn wir die Klimaschutzziele ernst nehmen, wird ein großer Teil der bereits explorierten fossilen Brennstoffe nicht mehr genutzt werden können. Haben Erdöl-Verteilungskriege demnächst umgekehrte Vorzeichen? Was geschieht mit den Regionen, in denen über Jahrzehnte eine Abhängigkeit von ihren Ölexporten entstanden ist? Die Niedrigpreisphase hat in mehreren Ländern deutliche Spuren hinterlassen. Wie können diese Länder gegensteuern, wenn die

1995		WSchVO							
2002			EnEV 2002						
2009				EnEv 2009	KfW 70	KfW 55	KfW 40		
2016					EnEV 2016	KfW 55	KfW 40	KfW 40plus	
2020						GEG 2020	KfW 40plus	KfW 30plus	KfW 30premium
2024							GEG 2024	KfW 30plus	KfW 30premium
Außenwand	U-Wert	0,30	0,28	0,24	0,22	0,20	≤ 0,16	≤ 0,15	≤ 0,15
Dach	U-Wert	0,28	0,26	0,24	0,20	0,14	≤ 0,12	≤ 0,12	≤ 0,12
KG-Decke	U-Wert	0,40	0,35	0,30	0,28	0,25	≤ 0,20	≤ 0,16	≤ 0,16
Fenster	U-Wert	1,80	1,60	1,30	≤ 0,9-1,1	≤ 0,9	≤ 0,8	≤ 0,75	≤ 0,75
Wärmebr.	ΔU_{WB}		0,05	0,05	0,05	0,035	0,02	0,02	0,02
Luftdichtheit	n_{50}		≤ 3,0 h^{-1}	≤ 1,5 h^{-1}	≤ 1,5 h^{-1}	≤ 1,0 h^{-1}	≤ 0,8 h^{-1}	≤ 0,6 h^{-1}	≤ 0,6 h^{-1}
Lüftung		k. A.	k. A.	Abluftanlagen		Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung			
Heizung/WW	% em.	k. A.	k. A.	ca. 20 %	ca. 20 %	≥ 30 %	≥ 40 %	≥ 60 %	≥ 90 %
Strom	% em.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	≥ 20 %	≥ 30 %	≥ 60 %	≥ 80 %
Heizwärmeb.	kWh/m²a	ca. 110	ca. 90	ca. 70	ca. 50	ca. 30	ca. 15	≤ 15	≤ 15

Abb. 6.8-4: *Energiestandards und Förderung: Im oberen Teil wird die Parallelverschiebung dargestellt, mit der die EnEV-Standards über die Jahre erfolgreich durch die KfW-Förderstandards vorbereitet wurden. Im unteren grau hinterlegten Bereich werden beispielhaft Gebäudekennwerte zum Erreichen der Standards aufgelistet. Grün markiert sind jeweils die Techniken, die für eine kostengünstige Fortschreibung entscheidend waren.*

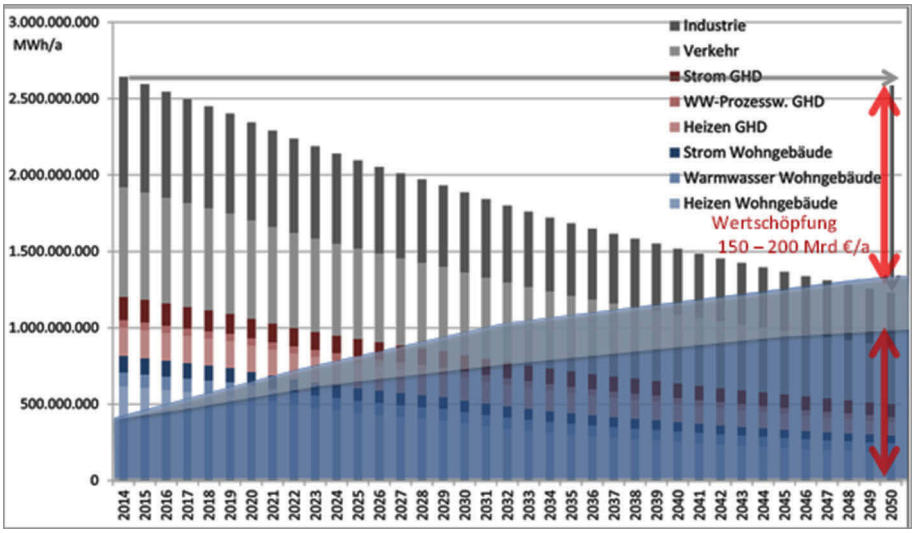


Abb. 6.8-5: *Entwicklung in Richtung Klimaneutralität in der BRD 2050: Mit Effizienzmaßnahmen müssen 50 bis 60 % Einsparung erzielt werden. Nur dann kann der Restbedarf erneuerbar gedeckt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für Lastmanagement und Speicherverluste 20 bis 40 % zusätzliche erneuerbare Energien generiert werden müssen (DGS & Schulze Darup 2015).*

fossile Energieproduktion noch weiter gedrosselt wird? Und was sind die Folgeprodukte, um die demnächst Verteilungskämpfe stattfinden? Es sind sicherlich Rohstoffe für Produkte wie Batterien oder PV-Module. Wie verhält es sich mit der Verwundbarkeit von Versorgungssystemen durch Cyber-Angriffe und wie sieht der Schutz davor aus? Kurzum: es besteht dringender Bedarf, frühzeitig politische Verantwortung für die geopolitischen Veränderungen zu übernehmen, um eine win-win-Situation für alle Länder zu erzielen und künftigen Konflikten bereits im Entstehen zu begegnen.

Zusammenfassung – der Weg zur Klimaneutralität im Gebäudebestand

Um den Weg der Decarbonierung zu gehen, müssen alle Länder die Balance zwischen Energieeinsparung und Erneuerbaren ausloten und umsetzen. Deutschland hat aufgrund seiner Rohstoffsituation und der hohen Bevölkerungsdichte eine eher ungünstige Ausgangsposition. Auf der anderen Seite verfügen wir über ein hohes Maß an Wissen, das es zu nutzen und intensiv weiterzuentwickeln gilt, wenn wir nicht ins Hintertreffen geraten und auch zukünftig anderen Ländern Lösungswege aufzuzeigen wollen. Im Gebäudebereich reichen die dargestellten Komponenten und Techniken aus, um Klimaneutralität bis 2050 zu erzielen. Dazu muss ab 2021 ein ambitionierter nZEB-Standard im Bereich der Passivhaus-Qualität in der Breite umgesetzt werden, und zwar bei weitestgehend erneuerbarer Versorgung der Gebäude. Die wesentlichen Einsparpotenziale verbergen sich indes nach wie vor im Bestand. Wer saniert, sollte ebenfalls einen hocheffizienten Standard zwischen 20 und 35 kWh/(m²a) für den Heizwärmebedarf anstreben, wobei denkmalgeschützte und baukulturell

wichtige Gebäude selbstverständlich auch nach der Sanierung mehr verbrauchen dürfen.

Uns steht ein ungeheurer Kraftakt bevor, die aktuelle Sanierungsquote von 1,0 Prozent auf 1,6 bis 1,8 Prozent zu erhöhen. Dieser Wert stellt zugleich aus Nachhaltigkeitssicht ein Optimum dar, weil die daraus resultierende Nutzungszeit der Baukonstruktionen etwa 60 Jahren entspricht. Als Ergebnis ist in der BRD-Bilanz eine Energieeinsparung von 50 bis 55 % bis 2050 erzielbar. Auf dieser Grundlage ist es möglich, den Restbedarf kostengünstig regenerativ zu decken. Dabei liegen die Grenzen der erneuerbaren Ressourcen nicht in technischen Hürden, sondern sind in der begrenzt verfügbaren Fläche zu sehen. Bereits heute wird um Gebiete für Solar-, Wind- und Biomasseflächen gerungen. Einen großen Teil der erneuerbaren Techniken gilt es in die Gebäude- und Siedlungsstrukturen zu integrieren und dabei eine hohe gestalterische Qualität zu erzielen. Die eigentliche Herausforderung ist eine kulturverträgliche Lösung, die Belange von Landschaftsschutz, Stadtplanung und Baukultur gleichermaßen berücksichtigt (DGS, Schulze Darup 2015). *Abb. 6.8-5* zeigt die Entwicklung in Richtung Klimaneutralität in der BRD 2050: Mit Effizienzmaßnahmen müssen 50 bis 60 % Einsparung erzielt werden. Nur dann kann der Restbedarf erneuerbar gedeckt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für Lastmanagement und Speicherverluste 20 bis 40 % zusätzliche erneuerbare Energien generiert werden müssen. Die Bauschaffenden können einen großen Beitrag zum Gelingen der Energiewende beitragen. Zugleich stellt dieser herausfordernde Prozess eine Chance dar, unsere gebaute Umwelt hochwertig weiterzuentwickeln. Last but not least noch der Hinweis, dass die Wertschöpfung durch Effizienz und Erneuerbare bei konsequenter Umsetzung der Energiewende in Deutschland 150 bis 200 Mrd. Euro jährlich betragen wird. Das entspricht zwei bis drei Millionen Arbeitsplätzen. Diejenigen Regionen und Akteure werden Gewinner der Energiewende sein, die bei diesem Prozess vorneweg gehen und die Erfahrungen der Best Practice Techniken in der Folge zu „exportieren“ wissen (Schulze Darup 2018b).

Quellen & Literatur

BBSR (2019: eLCA – Werkzeug zur Ermittlung von Lebenszyklusanalysen von Bauteilen und Gebäuden. – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, *https://www.bauteileditor.de/.*

BERMICH R. (2014): Kostenvergleich unterschiedlicher Baustandards Wohngebäude. – Amt für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie der Stadt Heidelberg 2014.

BMUB (2015): Bündnis für bezahlbares Wohnen und Bauen (Hrsg): Bericht der Baukostensenkungskommission Berlin.

DESTATIS (2015): Vom Bauherren/Architekten veranschlagte Baukosten nach DIN 276 zum Zeitpunkt des Bauantrags. – Statistisches Bundesamt 2015 (Daten aufbereitet durch Werner Eicke-Hennig / Burkhard Schulze Darup).

DGS & SCHULZE DARUP B. (2015): Klimaschutzszenario – Strategien zur Klimaneutralität im Gebäudebestand bis 2050. – Im Auftrag der DGS, gefördert durch das BMUB Berlin 2015

ECOFYS & SCHULZE DARUP (2014): Preisentwicklung Gebäudeenergieeffizienz. – Im Auftrag der DENEFF, Berlin 2014.

F+B (2016): Analyse des Einflusses der energetischen Standards auf die Baukosten im öffentlich geförderten Wohnungsbau. - Hamburg 2016.

PASSIVHAUS INSTITUT DARMSTADT (2017): PER-Faktoren – in: PHPP (Passivhaus Projektierungs Paket) des Passivhaus Instituts Darmstadt 2017.

SCHULZE DARUP B. (2018): Burkhard: Wohnungslüftung. – Broschüre im Auftrag des LfU Bayern, Augsburg 2018.

SCHULZE DARUP B. (2018a): Kostengünstiger und zukunftsfähiger Geschosswohnungsbau im Quartier. – Forschungsvorhaben in Arbeitsgemeinschaft mit ABG FRANKFURT, BGW Bielefeld, GEWOBAU Erlangen, GUNDLACH Hannover, HOWOGE Berlin mit Förderung der DBU (AZ 33119/01-25) Berlin.

SCHULZE DARUP B. (2018b): Yes, we can! – Der Beitrag basiert auf dem Artikel im Gebäudeenergieberater GEB 07/08 2018.

WALBERG D., T. GNIECHWITZ & M. HALSTENBERG (2015): Kostentreiber für den Wohnungsbau. – ARGE e.V. Bauforschungsbericht Nr. 67 Kiel 2015.

Dr. Schulze Darup ist freischaffender Architekt und Stadtplaner. Seine Tätigkeitsschwerpunkte liegen in der Durchführung und Begleitung von Sanierungs- und Neubauprojekten im Bereich des nachhaltigen und energieeffizienten Bauens, v.a. die Erzielung von Plusenergie-Konzepten und die Übertragung innovativer Neubautechnik auf den Bestand unter Bewahrung der Baukultur. Dabei haben städtebauliche Fragen und Quartierskonzepte zunehmend eine große Bedeutung unter Einbeziehung innovativer Versorgungslösungen und den Chancen neuer Mobilitätskonzepte. Darüber hinaus beschäftigt er sich neben zahlreichen Forschungsvorhaben und Veröffentlichungen in den letzten Jahren mit der Fragestellung, wie unser Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität erreichen kann.

Kontakt:
Dr. Burkhard Schulze Darup
schulze darup & partner architekten
Berlin - www.schulze-darup.de
schulze-darup@schulze-darup.de

Schulze Darup B. (2019): Klimaneutralität im Gebäudebestand bis 2050 – wie geht das? In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 247-254. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.36.

6.9 Entwicklung des Gebäudeenergiebedarfs und Einsparziele in Deutschland und in verschiedenen Ländern in Asien

Dirk Schwede

Der Energiebedarf zur Gebäudekonditionierung steigt derzeit in vielen Ländern weltweit rasant an und damit auch die Emissionen von Treibhausgasen aus der Energieerzeugung für den Gebäudesektor. Mit der wirtschaftlichen Entwicklung in den Ländern des globalen Südens steigen die Ansprüche an den Gebäudekomfort. Folglich nimmt die technische Ausstattung der Gebäude für Heizen, Kühlen und andere Gebäudeleistungen im Neubau und im Gebäudebestand global zu. Die rasante Bautätigkeit infolge der anhaltendenden Urbanisierung in vielen Ländern führt zu höherem spezifischen Energiebedarf pro Fläche und auch die Wohnflächen pro Kopf steigen weltweit an. Der Klimawandel und die Erwärmung von urbanen Räumen führt zur Zunahme von Hitzewellen und folglich zu einem gesteigerten Kühlenergiebedarf. Auch in Regionen, in denen traditionell die Gebäudekühlung keine Rolle spielte, nehmen die Installationszahlen von Kältegeräten beständig zu. Auch das Heizverhalten in den moderaten und kalten Weltregionen ändert sich. Zusammengenommen wirken diese Faktoren den globalen Treibhausgaseinsparzielen entgegen. In allen Ländern sind integrierte Strategien und effektive angepasste planerische, technische und politische Maßnahmen notwendig, um den Gebäudeenergiebedarf bei einer notwendigen Steigerung der Nutzungsqualität zu senken.

Development of building energy demand and savings targets in Germany and in various countries in Asia: *The energy demand for building conditioning is currently increasing rapidly in many countries around the world, and thus also the emissions of greenhouse gases from energy production for the building sector. With the economic development in the countries of the global south, the demands on the comfort conditions in buildings are increasing. As a result, the installation of technical equipment for heating, cooling and other building services in the new buildings and the retrofit in the existing building stock is increasing globally. The rapid construction activity as a result of the ongoing urbanisation in many countries leads to higher specific energy demand per area and the per capita living space is increasing worldwide. Climate change and the warming of urban areas are leading to an increase in heat waves and consequently to increased cooling energy requirements. Even in regions where building cooling was traditionally insignificant, the number of refrigeration appliance installations is constantly increasing. The heating behaviour in the moderate and cold regions of the world is also changing. Taken together, these factors counteract the global greenhouse gas savings targets. Integrated strategies and effective adapted planning, technical and political measures are necessary in all countries in order to reduce the building energy demand with a necessary increase of quality of use.*

Nach dem fünften IPCC Bericht (Lucon et al. 2014) waren Gebäude im Jahr 2010 weltweit für 32% des globalen Endenergiebedarfs, 19% der energiebezogenen Treibhausgasemissionen und bis zu einem Drittel der Emissionen von fluorierten Kohlenwasserstoffen verantwortlich. In Deutschland tragen die Direktemissionen aus Verbrennungsprozessen im Gebäudesektor nach Angaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU 2019a) etwa 14% der gesamten Treibhausgasemissionen bei. Werden die indirekten Emissionen, beispielsweise aus dem im Gebäude verbrauchten Strom, eingerechnet liegt der Anteil des Gebäudesektors etwa bei 30%. Durch umfangreiche technische und verordnungstechnische Maßnahmen wurden die Treibhausgasemissionen zwischen 1990 bis 2018 in Deutschland geschätzt bereits um etwa 44% reduziert (BMU 2019b).

Während in den OCED Staaten die äquivalenten CO_2-Emissionen im Gebäudesektor in der ersten Dekade dieses Jahrhunderts auf hohem Niveau ihren Höhepunkt erreicht haben, steigen die CO_2-Emissionen im Gebäudesektor in den nicht OECD Staaten in Asien, Afrika, dem mittleren Osten und in Lateinamerika von vergleichsweise niedrigem Niveau rasant an (Lucon et al. 2014).

Gleichzeitig spielen die Bautätigkeit und die Immobilienwirtschaft eine bedeutende Rolle für die ökonomische und gesellschaftliche Entwicklung in nahezu allen sich entwickelnden Ländern.

Neue Gebäude und Stadtentwicklungen tragen zur Verbesserung der notwendigen Versorgungssysteme und zur allgemeinen Lebensqualität breiter Bevölkerungsschichten bei. Der Bausektor bietet Beschäftigung für ungelernte und gelernte Arbeitskräfte (Berk & Bicen 2018) und die notwendige Ausstattung von Gebäuden fördert eine positive Entwicklung anderer Sektoren. Auch bereitet die Neugestaltung der gebauten Umwelt die Bühne für den gesellschaftlichen und intellektuellen Wandel.

Die kurzfristigen sozialen, politischen, ökonomischen und oft auch volkswirtschaftlichen Einflüsse stehen den Zielen des energieeffizienten Bauens und besonders auch den Zielen der Ressourcenschonung entgegen. Effektive Strategien zum Klimaschutz im Gebäudesektor beinhalten daher über die rein technischen Maßnahmen hinaus einen weitreichenden ganzheitlichen Rahmen von abgestimmten Interventionen.

Sozioökonomische Entwicklung und Verstädterung im globalen Süden

In den Ländern des globalen Südens sind die Städte das Zentrum der ökonomischen und sozialen Entwicklung. Auch in Ländern die in ihrer wirtschaftlichen Entwicklung noch am Anfang stehen, sind in den Städten Bevölkerungsschichten zu finden, die durch ihren Lebensstil in der Regel überdurchschnittlich und oft in einer mit den Industrienationen vergleichbaren Maße zum Umweltverbrauch beitragen. Diese Gruppen lassen das zukünftige Verbrauchsprofil der nachfolgenden Bevölkerungsschichten erahnen.

Nach Schätzungen der UNDP (UNDP 2013) wird die Mittelklassenbevölkerung weltweit von 1,8 Milliarden Menschen in 2009, auf 3,2 Milliarden in 2020 und dann auf 4,8 Milliarden Menschen ansteigen.

Während die Zahlen in Europa und Nordamerika etwa gleich bleiben, sind vor allem in Asien, aber auch in Zentral- und Südamerika und in Afrika starke Zuwächse der Bevölkerungsschichten mit ausreichend verfügbarem Einkommen zur umfangreichen Gebäudeklimatisierung zu erwarten.

Mit steigendendem Familieneinkommen werden moderne technische Ausstattungen in den Wohnungen bezahlbar. Der Japanische Verband der Kälte- und Klimaindustrie gibt an, dass sich der Markt für Raumklimageräte ab einem Bruttoinlandsprodukt von 3000 US$/Person rasant entwickelt (Nikkei Asia Review 2018). Beispielsweise ist das durchschnittliche BIP in Vietnam von 2008 bis 2018 von 1149US$/Person auf 2564US$/Person gestiegen und hat sich so innerhalb von 10 Jahren mehr als verdoppelt (World Bank 2019a). Eine weitere Steigerung ist zu erwarten und es ist nur eine Frage der Zeit, bis die 3000US$/Person Grenze überschritten wird. Es ist offensichtlich, dass die Wirtschaftskraft in den urbanen Räumen von Hanoi and HCMC wesentlich über dem Landesdurchschnitt liegt und hier auch schon heute die Neubautätigkeit und die Gebäudeausstattung überdurchschnittlich sind.

Mit einem Urbanisierungsgrad von unter 40% in 2018 und einem erwarteten Anstieg auf nahezu 60% in 2050 (United Nations 2018) ist eine Steigerung des Energieverbrauches zu erwarten, wenn dann 50% mehr Einwohner in den Städten leben.

Ähnliche Entwicklungen wie in Vietnam finden derzeit in vielen Ländern der Region und anderen Ländern des globalen Südens statt. Entsprechend sind die Verkaufszahlen von Klimageräten in Asien vom 2011 bis 2016 um 34.3% gestiegen und sie haben sich in Vietnam bei rasanter wirtschaftlicher Entwicklung sogar mehr als verdoppelt (Berk & Bicen 2018).

Neben dem verfügbaren Haushaltseinkommen für die Anschaffung von moderner Gebäudetechnik, sind in vielen Ländern die Energiekosten bzw. die Energietarife ein entscheidender Faktor für den Umfang der Gebäudekonditionierung und das Nutzerverhalten. In einigen Gesellschaften gehen die Nutzer traditionell sorgsam mit der Klimatisierung um und betreiben die Anlagen sehr bedacht bedarfsgerecht.

Allerdings sind die Energiepreise in vielen Ländern heute noch als Mittel der Sozialpolitik subventioniert, so dass ökonomische Aspekte auf diesem Preisniveau nicht wirksam zur Energieeinsparung beitragen. Ein höheres Tarifniveau wäre für die Umsetzung von Energieeinsparung und den Klimaschutz förderlich. Allerdings wurde jüngst auch die gesellschaftliche Bedeutung der Energiepreise für den sozialen Frieden durch Proteste nach Energiepreiserhöhungen, z.B. in

Tab. 6.9-1: *Sozioökonomische Entwicklung und Verstädterung in verschiedenen Ländern des globalen Südens und in Deutschland (Zahlen aus (World Bank 2019a, World Bank 2019b, United Nations 2018) für 1990 und 2018, (GPP 2019) für 2019, (World Bank 2019c) für 1990 und 2014, (EAC 2016) für 2015,), Beabsichtigte National festgelegte Beiträge (INDC) (INDC 2015, INDC 2019).*

Land	Bevölkerung [Million]	BIP [US$/ Person]	Strompreise für Haushalte [US$/kWh]	Anteil der Bevölkerung in Städten [%]		CO_2-Ausstoß [kg/Person]		Paris Abkommen S: unterschrieben SR: ratifiziert SA: genehmigt
Quelle	2018 (World Bank 2019-2)	2018 (World Bank 2019-1)	1:(GPP 2019), 2:(EAC 2016)	1990 (United Nations 2018)	2018 (United Nations 2018)	1990 (World Bank 2019-3)	2014 (World Bank 2019-3)	(United Nations 2019), 1:(INDC 2019), 2:(INDC 2015)
Deutschland	83	48.196	0,35[1]	73,1	77,3	11.622	8.889	SR
China	1392	9.77	0,08[1]	26,4	59,2	2.151	7.544	SR, INDC[1]
Iran	82	5.628	0,03[1]	56,3	74,9	3.734	8.384	S, INDC[1]
Kambodscha	16	1.527	0,20[2]	15,5	23,4	141	438	SR, INDC[1]
Vietnam	96	2.564	0,07[1]	20,3	35,9	315	1.82	SA, INDC[2]

Frankreich und in Ecuador, deutlich. Auch sind die Energietarife wirksam für die wirtschaftliche Entwicklung besonders in Volkswirtschaften mit energieintensiven Industriesektoren.

Die Regierungen setzen die Energiepreise weiterhin als sozialpolitische und wirtschaftspolitische Instrumente ein. In einer solchen Situation sind Bauherren und die Gebäudenutzer nicht wirtschaftlich zur Umsetzung von Energiesparmaßnahmen zu motivieren.

Wirkungen des Klimawandels

Der Klimawandel führt zu einem Anstieg der Temperaturen an vielen Orten der Erde und besonders in den Städten. Während früher kurze Hitzewellen hingenommen wurden, sind die Temperaturen und die Dauer der Hitzeperioden heute den Bewohnern bewusst.

Im Winter führen mildere Temperaturen zu Heizenergieeinsparungen und im Sommer die Hitzewellen zu einem neuen empfundenen Kühlenergiebedarf. In dieser Situation werden Klimaanlagen beworben und folglich steigen die Installationszahlen auch an Orten, an denen früher nicht gekühlt wurde (Bryant 2019, FAZ 2018). Der Kühlenergieverbrauch in Wohngebäuden steigt derzeit an vielen Orten weltweit und auch in Deutschland an.

Nutzerverhalten und Nutzereinflüsse

In den warmen Weltregionen sind viele Gebäudenutzer heute gekühlte Räume von ihren Arbeitsplätzen gewohnt und Klimageräte werden für wachsende Gruppen von Stadtbewohnern bezahlbar. Folglich werden Klimageräte zunehmend auch in Wohnungen installiert. Da diese Klimageräte nun auch in Zeiten betrieben werden, in denen traditionell andere Komfortstrategien eingesetzt wurden, steigen die Laufzeiten und damit der Energieverbrauch spürbar an. Da das Raumklima nun mechanisch individuell angepasst werden kann, gehen traditionelle adaptierte Verhaltensweisen und auch lokale klimatisch angepasste Entwurfs- und Klimatisierungsstrategien verloren.

Als weiteren Einfluss auf den Gebäudeenergiebedarf nennt der IPCC Bericht (Lucon et al. 2014) für den Wohnbereich den Anstieg der Wohnfläche pro Person und die Reduzierung der Haushaltsgrößen. Gleichzeitig nimmt die technische Ausstattung in modernen Haushalten zu.

Klimawirkung von Gebäuden

Mit steigender technischer Ausstattung mit Anlagen und Geräten zur Gebäudekonditionierung, aber auch durch die zunehmende Ausstattung mit Haushaltsgeräten steigt der Energiebedarf und folglich die damit verbundenen CO_2-Emissionen aus der Energieerzeugung.

Durch die weltweite Zunahme des Gebäudekühlbedarfs wird darüber hinaus durch die Installation, die Instandhaltung und beim Austausch von Klimageräten klimawirksames Kältemittel freigesetzt. Es wird nach (Munzinger & Gessner 2015) davon ausgegangen, dass etwa drei Viertel durch den Energieverbrauch der Klimatechnik im Betrieb und ein Viertel der Klimawirkung für die Kühlung und Klimatisierung durch die Freisetzung von Klimagasen verursacht wird.

Zum Schutz der Ozonschicht wurden durch das Montreal Protokoll schon 1987 HCFCs (Hydroclorfluorcarbone) durch weiterhin klimawirksame HFCs (Hydrofluorcarbone) ersetzt (Munzinger & Gessner 2015). Die Kältemittel wurden jedoch erst kürzlich hinsichtlich ihrer Klimawirkung in einem Zusatzprotokoll adressiert. Dieses Zusatzprotokoll sieht für einige Länder und besonders für Länder mit einem hohen Urbanisierungsdruck und damit einem rasanten Anstieg der Installationszahlen heute noch lange Übergangszeiten für den Ersatz der klimawirksamen Kältemittel vor. Dabei sind alternative Kältemittel mit geringerer Klimawirkung heute technisch verfügbar.

Je nach Stand der lokalen Gesetzgebung, den in dem jeweiligen Markt verfügbaren Technologien und dem vorhandenen Problembewusstsein werden daher in einigen Ländern voraussichtlich noch lange weiterhin Klimageräte mit klimawirksamen Kältemitteln eingesetzt. Besonders bei kleinen verteilten Klimageräten (Splittgeräten) besteht die Gefahr, dass bei der Installation, der Wartung und im Betrieb klimawirksame Kältemittel in großen Mengen emittiert werden.

Einsparziele der Länder

Im Folgenden werden vor dem Hintergrund der vorausgegangenen Ausführungen die Treibhausgaseinsparziele von Ländern diskutiert, in denen der Autor derzeit im Rahmen der internationalen technischen und wissenschaftlichen Zusammenarbeit im Bereich des energieeffizienten und nachhaltigen Bauens tätig ist. Die hier aufgeführten Länder sind China, der Iran, Kambodscha und Vietnam. Die Zielsetzungen des deutschen Klimaschutzprogramms werden einführend zu Einordnung gegeben.

Es werden die Einsparziele, wie sie in den national festgelegten geplanten Beiträgen (Intended Nationally Determined Contribution (INDC)) zum Klimaschutzabkommen von Paris der jeweiligen Länder formuliert sind, betrachtet. Der Gebäudesektor wird dabei in den IDNCs der jeweiligen Länder mehr oder weniger zur Erreichung der Einsparziele herangezogen.

Während Deutschland die Treibhausgaseinsparziele in Bezug auf die absoluten Zahlen des Jahres 1990 formuliert, sind die beabsichtigten national festgelegten Beiträge zum Klimaschutzabkommen von Paris der betrachteten Länder in Bezug auf den üblichen Trend (*business as usual* (BAU)) seit einem Bezugsjahr bzw. im Fall von China in Bezug auf die Wirtschaftsleistung (Energieintensität) formuliert.

Anders als in Deutschland geht es bei den Einsparzielen in den betrachteten Ländern also nicht um eine Reduktion der absoluten nationalen Emissionen, sondern um eine Abschwächung des vorausgesagten Trends, wenn die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung ohne gezielte Klimaschutzmaßnahmen voranschreitet.

Deutschland

Nach *Tab. 6.9-1* sind in Deutschland die CO_2-Emissionen pro Kopf aus Verbrennungsprozessen im Vergleich zum Jahr 1990 bis zum Jahr 2014 um 24% gesunken. Die Zielsetzung der Bundesregierung ist eine Senkung der Gesamttreibausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um 55% und die Klimaneutralität bis zum Jahr 2050. Als wichtiger Teil der Klimaschutzstrategie soll auch der Gebäudesektor bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität erreichen. Dazu sind ein umfangreicher politischer Rahmen und umfangreiche Fördermaßnahmen und Verordnungen formuliert. Die Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor wurden bereits in den vergangenen etwa 40 Jahren zielgerichtet und weitgehend erfolgreich reduziert. Weitere Schritte sind zur Zielerreichung jedoch offensichtlich notwendig (Schulze-Darup 2019) .

Tab. 6.9-2: *Zielsetzung der Deutschen Energiewende zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen (BMU 2019a).*

Ziel bis 2030	**55% absolut**
Ziel bis 2050	**klimaneutral**
Referenzjahr	**1990**

Tab. 6.9-3: *INDC für China (INDC 2019).*

Zielsetzung	**60-65% bezogen auf die Wirtschaftsleistung (BIP) zusätzlich Maßnahmen zur Reduktion und zur Kontrolle von F-Gas-Emissionen**
Referenzjahr	2005
Zeithorizont	2030

China

In China haben sich die durchschnittlichen CO_2-Emissionen pro Kopf bezogen auf die Gesamtwirtschaft zwischen 1990 (dem Referenzjahr der Einsparziele in Deutschland) und 2014 mit einem Faktor von etwa 2,5 mehr als verdoppelt. Allerdings lagen die durchschnittlichen absoluten pro-Kopf CO_2-Emissionen bezogen auf die Gesamtbevölkerung im Jahr 2014 noch etwa 15% unter den Werten in Deutschland. Es ist zu vermuten, dass in den urbanen Ballungszentren diese Werte wesentlich überschritten werden.

Der Anteil des Gebäudeenergiebedarfs daran lässt sich aus den vorliegenden Daten nicht angeben, allerdings ist mit Blick auf die anhaltende Urbanisierung, die damit verbundene Bautätigkeit und die Größe des Landes ein signifikanter Beitrag in absoluten Zahlen zu vermuten.

Als Gesamteinsparziel wird eine Reduktion des CO_2-Austoßes von 60-65% bezogen auf die Wirtschaftsleistung angestrebt. Es soll also die Energieintensität der chinesischen Wirtschaft deutlich reduziert werden.

Als Zielsetzung in Chinas IDNCs wird angegeben, dass grüne Gebäude bis 2020 einen Anteil von 50% am Neubauvolumen haben sollen. Allerdings ist der Begriff »Green Building« derzeit nicht abschließend definiert. Zwar gibt es einen nationalen Green Building Standard und auch wurden in den vergangenen Jahren schrittweise Gebäudeenergiestandards, bis hin zum nationalen Passivhausstandard, eingeführt, doch ist die Umsetzung und technische Ausgestaltung in vielen Fällen in den Provinzen und den Städten noch nicht abgeschlossen. Derzeit werden, auch teilweise in Zusammenarbeit mit internationalen Organisationen, wie der DENA und der GIZ von deutscher Seite, für die verschiedenen Klimazonen angepasste technische Konzepte und begleitende Instrumente entwickelt.

Zusätzlich zu den angekündigten CO_2-Einsparzielen werden laut IDNC eine Reduktion von HCFCs bis 2020 um 35% und bis 2025 um 67,5% im Vergleich zum Stand von 2010 angestrebt. Auch soll die Emission von HFCs bis zum Jahr 2020 effektiv kontrolliert werden.

Tab. 6.9-4: *INDC für den Iran (INDC 2019).*

Zielsetzung aus eigener Leistung	**4% zum BAU der CO_2-Äquivalente**
Zielsetzung mit internationaler Unterstützung	**8% zum BAU der CO_2-Äquivalente**
Referenzjahr	2010
Zeithorizont	2030

Iran

Der Iran weist mit einem Anteil der Bevölkerung in Städten von heute etwa 75% ähnliche Werte wie Deutschland auf. Auch in Bezug auf die Bevölkerungszahl und die CO_2-Emissionen pro Kopf ist der Iran mit Deutschland vergleichbar. Dabei ist bei wesentlich geringerer Wirtschaftsleistung die Energieintensität sehr hoch. Entsprechend hoch sind heute die spezifischen Energieverbrauchswerte im Gebäudesektor für Wohn- und Nichtwohngebäude. Es wären mit dieser Ausgangslage offensichtlich sehr hohe Einsparpotentiale durch einfache Effizienzmaßnahmen oder sogar nur durch bedarfsgerechten und optimierten Gebäudebetrieb (Energieaudits, geordnete Inbetriebnahme) und verbessertes Nutzerverhalten zu realisieren.

Der Iran ist reich an eigenen fossilen Energieressourcen und die Energiepreise im Land sind im weltweiten Vergleich sehr gering und auch unterhalb der Weltmarktpreise. Wirtschaftliche Anreize für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnamen sind unter diesen Voraussetzungen für die Endnutzer nicht gegeben. Finanzierungsmodelle für Energieeffizienzmaßnahmen, die in internationalen Kooperationsprojekten, wie zum Beispiel den UNDP GEF Projekt EEEB (UNDP 2019), entwickelt werden, argumentieren heute mit eingesparten Energiesubventionen bzw. mit den erreichbaren Erlösen auf dem Weltmarkt als volkswirtschaftlichen Anreiz.

Die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen (wie auch der Einsatz von anderen technischen Geräten aus dem Ausland) wird auch durch die langjährigen Sanktionen gegen das Land behindert. Die Wirtschaftsleistung ist von dem historischen Höchstwert von 7.928 US$/Person im Jahr 2012 durch die verschärften Sanktionen heute auf einem Wert von 5.628 US$/Person gesunken.

Vor diesem Hintergrund gibt der Iran als Einsparziel nur 4% CO_2-Äquivalente im Vergleich zum Trend aus eigener Leistung und 8%, falls das Land international unterstützt wird, an. Diese Zielsetzungen sind angesichts der hohen Energieintensität der Iranischen Wirtschaft und der dabei zu erwartenden Energieeinsparpotentiale nicht ausreichend. Im Falle, dass die internationalen Sanktionen gegen den Iran gelockert werden, ist mit einer Steigerung des Konsums und einem damit einhergehenden höheren Energieverbrauch aber gleichzeitig auch mit dem Einsatz von dann verfügbaren Effizienztechnologien zu rechnen.

Kambodscha

Mit einer Wirtschaftsleistung von 1.527 US$/Person steht Kambodscha noch am Anfang seiner wirtschaftlichen Entwicklung. Der Anteil der Stadtbevölkerung betrug 2018 gerade mal 23,4% und der Zugang zur Elektrizität der Bevölkerung lag zur Jahrtausendwende nach Zahlen der Weltbank noch bei unter 20% und ist seit dem auf nahezu 90% gestiegen (World Bank 2019d). In den Städten erfolgte in dieser Zeit ein Anstieg der Elektrizitätsversorgung von nahezu 60% auf 99% (World Bank 2019e). Besonders ist der im internationalen Vergleich sehr hohe Elektrizitätspreis (EAC 2016) in dem sich die Investitionen in die Energieinfrastruktur und auch die Importabhängigkeit der Energieversorgung wiederspiegeln. Mit diesem Preisniveau lassen sich Maßnahmen zur Energieeffizienz und zu Energieeinsparung durch die Endverbraucher wie auch auf nationaler Ebene in Kambodscha wirtschaftlich gut begründen.

Kambodscha war bis zum Jahr 2000 auf Grund der großen Waldflächen, der vergleichsweise dünnen Besiedelung und der geringen Wirtschaftsleistung nach Angaben des INDC Dokuments noch eine Senke für den globalen CO_2-Haushalt. So spielt in den INDCs auch die Erhaltung des Waldes und die Aufforstung eine bedeutende Rolle.

In der Formulierung der Einsparziele bezieht sich das INDC Dokument auf den Cambodia Climate Change Strategic Plan (CCCSP) (2014-2023) wonach der Gebäudebereich vorrangig durch Maßnahmen der Energieeffizienz durch den Nutzer und die Installation von Anlagen zur Erzeugung von erneuerbaren Energien zu den Einsparzielen beitragen soll. Die Einsparungen im Gebäudebereich werden zwar erwähnt, jedoch nur mit einem scheinbar sehr geringen Anteil von 1% gegen den Trend für die Erreichung der Einsparziele herangezogen. Weiter detailliert sind diese Zielsetzungen und die dazu vorgesehenen Maßnahmen bisher nicht.

Das BAU Szenario ergibt für die Gesamtwirtschaft jedoch einen im internationalen Vergleich sehr geringen Referenzwert für das Jahr 2030 von etwa 725 kg CO_2e/Person (bei diesem Wert handelt es sich um CO_2-Äquivalente, er ist also nicht direkt mit den Werten in *Tab. 6.9-1* zu vergleichen). Ausgehend von diesem

Tab. 6.9-5: *INDC für Kambodscha (INDC 2019).*

Zielsetzung	**27% zum BAU de CO_2-Äquivalente zusätzlich Zielsetzungen zur Ausweitung der Waldflächen zur Bindung von CO_2**
Referenzjahr	2010
Zeithorizont	2030

Wert sollen gesamt 27% und davon im Gebäudesektor 1% eingespart werden. Dies wäre angesichts der zu erwartenden Bautätigkeit und der oben beschriebenen Trends des Gebäudeenergiebedarfs im internationalen und regionalen Vergleich eine beachtliche Leistung, die neue richtungsweisende Ansätze im Bauen und in der Gebäudetechnik erfordert. Solche Ansätze werden derzeit in dem vom deutschen BMBF geförderten Forschungsprojekt Build4People (Build4People 2019) systematisch untersucht.

Vietnam

Mit einem Urbanisierungsgrad von nur 35,9% und einer Wirtschaftsleistung von 2.564 US$/Person und steht auch Vietnam noch am Anfang einer absehbaren wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung. Dabei sind die Energiepreise derzeit gering auf einem Niveau ähnlich wie in China. Bei einem immer noch vergleichsweise geringen Lohnniveau ist die Investition in Energieeffizienzmaßnahmen wenig überzeugend. Die absoluten Energiekosten werden jedoch, augenscheinlich, derzeit noch durch ein bewusstes Nutzerverhalten, durch angepasste Betriebszeiten und auch durch den Verzicht von Komfort im Wohnbereich reduziert. Dieser Hintergrund wird derzeit in dem vom deutschen BMBF geförderten Forschungsprojekt CAMaRSEC (CAMaRSEC 2019) systematisch durch Nutzerbefragungen und Gebäudeaudits untersucht.

Tab. 6.9-6: *INDC für Vietnam (INDC 2015).*

Zielsetzung aus eigener Leistung	**8% zum BAU der CO_2-Äquivalente**
Zielsetzung mit internationaler Unterstützung	**25% zum BAU der CO_2-Äquivalente**
Referenzjahr	2010
Zeithorizont	2030



Abb. 6.9-1: *Verkauf von Raumklimageräten in Hanoi, Vietnam (eigenes Bild).*

Als Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele werden in dem IDNC-Dokument die Energieeinsparung, die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen und die Installation von erneuerbaren Energietechnologien im Gebäudebereich genannt. Weiterhin ist die Kennzeichnung von effizienten technischen Geräten, wie zum Beispiel Ventilatoren, Klimageräten und anderen technischen Geräten des täglichen Gebrauchs, durch ein geregeltes Labeling-System, als Maßnahme zur Reduzierung des zukünftigen Anstiegs der Treibhausgasemission im Wohnbereich genannt. Ein neuer Gebäudeenergiestandard für große Wohngebäude und Nichtwohngebäude wurde in den vergangenen Jahren entwickelt und wird nun mit begleitenden Maßnahmen in den Markt eingeführt. Eine nachhaltige Wirkung kann das Regelwerk aber auf Grund der Marktsituation, technischer Probleme in der Umsetzung und die fehlende Durchsetzungskraft der zuständigen Behörden bisher nicht entfalten.

Als Referenzwert für die Einsparungen wird in dem INDC-Dokument für das Jahr 2010 246,8 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente oder umgerechnet 2.571 kg-CO_2e/Person, angenommen mit einer vorausgesagten Menge im Jahr 2020 auf 474,1 Millionen Tonnen und einer Steigerung auf 787,4 Millionen Tonnen im Jahr 2030. Dies entspricht einer vorausgesagten Verdoppelung bzw. Verdreifachung in den Jahren 2020 bzw. 2030. Bis 2030 sind folglich Steigerungen der CO_2-Emissionen auf Werte wie heute in Deutschland, China und dem Iran zu erwarten. Die Einsparziele sind in Bezug auf diese Werte formuliert und betragen 8% aus eigener Leistung und bei wirksamer internationaler Unterstützung bis zu 25%.

Lösungsansätze

Der Gebäudesektor bietet in vielen Ländern heute bedeutende Potentiale zur Reduzierung der zukünftigen Treibhausgasemissionen. In vielen Fällen sind die Maßnahmen dazu wirtschaftlich und haben oft positive Nebenwirkungen, wie eine bessere Versorgung der Bewohner und eine gesteigerte Wohnqualität. Auch fördern Maßnahmen zum Klimaschutz im Gebäudesektor die wirtschaftliche Entwicklung und die nachhaltige Innovation der lokalen Wirtschaft.

Die Erfahrung, die Deutschland in den vergangenen 40 Jahren mit der Reduzierung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor gemacht hat, sind für die Erreichung der Klimaschutzziele in anderen Ländern und auch in Ländern des globalen Südens überaus wertvoll. Die Erfolgsgeschichte der durch die Energiewende ausgelösten Innovation der

Bauwirtschaft, ist hier durchaus attraktiv. Für den direkten Transfer sind die Erfahrungen und technischen Ansätze jedoch nur bedingt geeignet. Die notwendigen technischen, förder- und verwaltungstechnischen Instrumente müssen in Detail analysiert und lokal angepasst werden. Parallel müssen die Fähigkeiten im jeweiligen Markt zur Planung und Umsetzung der Maßnahmen entwickelt werden.

Dabei sind verschiedene Situationen zu betrachten. Zum einen gibt es Länder in denen der Gebäudeenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von fossilen Energieträgern traditionell hoch sind und nun durch Energieeffizienzmaßnahmen reduziert werden müssen. Zu diesen Ländern gehören in dieser Aufstellung Deutschland und der Iran. In der anderen Gruppe steht die Vermeidung des Zuwachses von zukünftigen Emissionen im Vordergrund. Zu diesen Ländern gehört Vietnam, Kambodscha und teilweise noch China. Nach der Entwicklung der vergangenen Jahre und bei weit fortgeschrittener Urbanisierung besteht in Ländern wie China parallel offensichtlich auch die Notwendigkeit den Gebäudeenergiebedarf zu reduzieren. Die im BAU-Szenario vorausgesagten CO_2-Emissionswerte für Vietnam lassen heute vermuten, dass auch Vietnam zunächst eine ähnliche Entwicklung wie China durchlaufen wird, bevor die Emissionswerte wieder wirksam gesenkt werden.

Gerade in den Ländern der zweiten Gruppe mit von niedrigen Niveau ansteigendem Energieverbrauch, ist ein Entwicklungsmodel nach Deutschem Vorbild kritisch zu hinterfragen. Es ist offensichtlich, dass technische Energieeffizienzansätze oft zu höheren Energieverbräuchen führen, als traditionelle lokalangepasste Gebäudekonzepte. So ist eine Kombination einer Wärmepumpe mit einer Fußbodenheizung zwar effizient in der Bereitstellung der Raumwärme, sie führt aber beispielsweise in Shanghai mitunter zu längeren Heizzeiten und damit zu einem gesteigerten Heizenergiebedarf im Vergleich zu bedarfsgerecht betriebenen Luftheizungen oder gar der traditionellen Gebäudenutzung. Ob nun der Zuwachs an thermischen Komfort oder angesichts des notwendigen Klimaschutzes der Komfortverzicht gerechtfertigt ist, ist aus deutscher Sicht schwer zu diskutieren. Zum einen stehen immer noch oft wirtschaftliche Interessen im Zusammenhang mit deutschen Technologieexporten im Vordergrund, auf der anderen Seite ist die Forderung nach Komfortverzicht von deutscher Seite in diesem Ländern selten gern gesehen.

Jedoch gibt es in den Ländern lokale Tendenzen, die auf eine genügsame Gebäudenutzung und einen bedachten Energiebedarf zielen. In China wird beispielsweise „der chinesische Weg“ der Komfortansprüche mit adaptiven Komfortmodellen diskutiert und auch in Vietnam werden die Komfortstandards lokal angepasst im Gebäudebetrieb bewusst zur Reduzierung des Energiebedarfs eingesetzt. In Thailand hat der verstorbene König Bhumibol die Philosophie der Suffizienz Ökonomie eingeführt, die auch in den INDC zur Erreichung der Klimaschutzziele für Thailand als leitendes Gedankenmodell genannt wird. Entscheidend wird sein, ob angesichts der sozioökonomischen Entwicklung die traditionell genügsame Gebäudenutzung bewahrt werden kann. Im Zusammenhang mit der in Deutschland aufkommenden Diskussion zur Suffizienz als dritte Säule der Nachhaltigkeit im Bauwesen, wäre ein Blick in die Länder des globalen Südens aufschlussreich.

Im Lichte des Klimawandels entstehen derzeit auch in Deutschland und anderen Ländern Europas neue Bedarfe, die zu einem gesteigerten Energieverbrauch und damit zum Verfehlen der Klimaschutzziele beitragen könnten. Die Verkaufszahlen von Klimageräten nehmen angesichts der wahrgenommenen Hitzewellen spürbar zu. Der zusätzliche Energiebedarf für die Kühlung ist derzeit für Wohngebäude noch nicht ausreichend reglementiert und wird bei Nachrüstung von Klimageräten (aus dem Baumarkt) nicht systematisch erfasst. Sollte sich der Trend zur einem höheren Kühlbedarf bestätigen käme zu den heutigen Energieverbräuchen ein wachsender Anteil an Treibhausgasemissionen in den Sommermonaten hinzu.

Während heute für den Gebäudesektor in vielen Ländern weitgehend einheitliche technologische Maßnahmen im Vordergrund stehen, fehlen in vielen Situationen noch die an das Klima, den Markt und den Akteurskontext angepassten Klimaschutzstrategien.

Klima- und kulturgerechte Bauweisen, ein angepasster Gebäudebetrieb und eine menschengerechte Stadtplanung tragen zum effektiven Energieeinsatz für die Gebäudeklimatisierung bei. Eingebettet in das lokale Klima und das kontrollierte Stadtklima bieten Gebäude optimale Wohn und Arbeitsbedingungen. Traditionelle Bauformen, aus Zeiten als keine energieintensive Klimatisierung möglich war, sind gute Vorlagen für die Planung moderner Gebäude. Darauf abgestimmte technische und in ihrer Effizienz optimierte Maßnahmen zur Gebäudeversorgung tragen dann zu Komfortklimatisierung bei. Weiterhin müssen die natürlichen Potentiale zur Gebäudekonditionierung und zur regenerativen Energieerzeugung herangezogen werden.

Schlussbetrachtung

Die obenstehenden Ausführungen machen deutlich, dass der Gebäudesektor für die Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland von großer Bedeutung ist. Die bisher erreichten Einsparungen sind beachtlich, jedoch sind für die Erreichung der angestrebten Klimaneutralität noch weitere Anstrengungen notwendig.

Es wird auch deutlich, dass trotz dieser großen nationalen Leistung ein klimaneutraler Gebäudesektor in Deutschland allein zum Klimaschutz global wenig wirksam sein wird. Die Unterstützung der Länder des globalen Südens zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und der Vermeidung von neuen Treibhausgasemissionen ist daher zu verstärken. Die Unterstützung sollte dabei nicht auf den Technologieexport, sondern auf die lokale Wirkung für den Klimaschutz ausgerichtet sein. Technische Maßnahmen und Konzepte sollten nicht vorrangig transferiert werden, sondern es sollen zunächst lokal angepasste Transformationsprozesse unterstützt werden.

Auch muss für die Zukunft in Deutschland der Kühlenergiebedarf und die effiziente Kühltechnik, so wie Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz in Deutschland in der Forschung verstärkt adressiert werden. Die Entwicklung und lokale Anpassung energieeffizienter Technologien und Ansätze ist durch Forschungsprogramme und durch umsetzungsorientierte Entwicklungsstrategien zu fördern. Vorrangig ist auch der weiteren Erwärmung der urbanen Räume zur Vermeidung des zukünftigen Kühlenergiebedarfs wirksam entgegenzuwirken.

Literatur

BERK N. & S. BIÇEN (2018): Causality between the Construction Sector and GDP Growth in Emerging Countries: The Case of Turkey. Athens Journal of Mediterranean Studies- Volume 4, Issue 1 – Pages 1936.

BMU (2019a): Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie. *https://www.bmu.de/themen/klimaenergie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/* (abgerufen 17.10.2019).

BMU (2019b): Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, Ausgabe 2019, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).

BRYANT C. (2019): Air Conditioning Is the World's Next Big Threat, Bloomberg Opinion, *https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2019-06-28/air-conditioningis-the-worlds-next-big-threat* (abgerufen 22.8.2019).

BUILD4PEOPLE (2019): Build4People - Research for Better Quality of Urban Life. *https://build4people.org/* (abgerufen 20.10.2019).

CAMaRSEC (2019): Climate-adapted material research for the socio-economic context in Vietnam. *https://www.camarsec.de/* (abgerufen 20.10.2019).

EAC (2016): Report on the Power Sector of the Kingdom of Cambodia 2016 Edition. Electricity Authority of Cambodia.*https://data.opendevelopmentmekong.net/dataset/1b0bd35b-d677-41d3-9de0-8628deaaa3e1/resource/00e72338-0564-4657-bf3f-fe03a28f0856/download/eacreportonpowersectorofthekingdomofcambodia2016edition00.00.2016.pdf* (abgerufen 17.10.2019).

FAZ (2018): Heiß auf Klimageräte. *https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/rekordsommer-fuer-klimageraete-hersteller-15731477.html* (abgerufen 18.10.2019).

GPP (2019): Global energy prices. *https://de.globalpetrolprices.com/electricity_prices/* (abgerufen 17.10.2019).

INDC (2015): Intended Nationally Determined Contribution of Viet Nam. *https://www.vn.undp.org/content/vietnam/en/home/library/environment_climate/indc-vietnam.html* (abgerufen 17.10.2019).

INDC (2019): *https://www4.unfccc.int/sites/submissions/indc/Submission%20Pages/submissions.aspx* (abgerufen 17.10.2019).

LUCON O., D. ÜRGE-VORSATZ, A. ZAIN AHMED, H. AKBARI et al. (2014): Buildings. In: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani et al.. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

MUNZINGER P. & A. GESSNER (2015): Climate-friendly Refrigeration and Air Conditioning: A Key Mitigation Option for INDCs“, Proklima, GIZ.

NIKKEI ASIA REVIEW (2018): „Air conditioner makers battle for Vietnam's redhot market“, https://asia.nikkei.com/Business/Businesstrends/Air-conditioner-makers-battle-for-Vietnams-red-hot-market (abgerufen 16.8.2019).

SCHULZE-DARUP B. (2019): „Klimaneutralität im Gebäudebestand bis 2050 – Wie geht das?“, siehe in dieser Publikation.

UNDP (2013): Human Development Report 2013, The Rise of the South: Human Progress in a Diverse World, United Nations Development Programme (UNDP).

UNDP (2019): Policy Reforms and Market Transformation of the Energy Efficient Buildings Sector of the I.R. Iran. *https://www.ir.undp.org/content/iran/en/home/projects/Policy-Reforms-and-Market-Transformation-of-the-Energy-Efficient-Buildings-Sector-of-Iran.html* (abgerufen 20.10.2019).

UNITED NATIONS (2018): World Urbanization Prospects 2018. *https://population.un.org/wup/.* (abgerufen 15.10.2019).

UNITED NATIONS (2019): Treaty Collection. *https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en* (abgerufen 17.10.2019).

WORLD BANK (2019a): GDP per capita (current US$). *https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD* (abgerufen 15.10.2019).

WORLD BANK (2019b): Population, total. *https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL* (abgerufen 15.10.2019).

WORLD BANK (2019c): CO_2 emissions (metric tons per capita). *https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC* (abgerufen 17.10.2019).

WORLD BANK (2019d): Access to electricity (% of population). *https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS* (abgerufen 20.10.2019).

WORLD BANK (2019e): Access to electricity, urban (% of urban populatio). *https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS* (abgerufen 20.10.2019).

Dr. Dirk Schwede ist Bauingenieur und arbeitet als Wissenschaftler an der Universität Stuttgart, als Experte in Projekten der DENA, GIZ, UNDP und ADB zur internationalen Entwicklungszu-sammenarbeit und als beratender Ingenieur. Von 2008 bis 2012 war er Geschäftsführer eines beratenden Ingenieurbüros für energie-effizientes und nachhaltiges Bauen in Shanghai und be-schäftigt sich seit dem mit der Umsetzung von Maßnahmen des energieeffizienten und nachhal-tigen Bauens in Asien als Beitrag zur globalen Energie- und Ressourcenwende. Derzeit arbeitet er an Projekten in Deutschland, China, Vietnam, Kambodscha und dem Iran.

Kontakt:
Dr. Dirk Schwede (PhD USyd AUS)
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
mail@dirk-schwede.de

Schwede Dirk (2019): Entwicklung des Gebäudeenergiebedarfs und Einsparziele in Deutschland und in verschiedenen Ländern in Asien. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 255-262. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.37.

6.10 Planerische Maßnahmen zur Reduzierung von lokalem Hitzestress für Menschen

Hyunjung Lee & Helmut Mayer

Lokaler Hitzestress, der durch das Zusammenwirken von veränderten atmosphärischen Hintergrundbedingungen infolge des regionalen Klimawandels mit der Dynamik in der Stadtentwicklung verursacht wird, stellt insbesondere für Menschen in Stadtquartieren eine Belastung dar, die damit in der Vergangenheit weniger konfrontiert waren, wie z. B. in mitteleuropäischen Städten. Aufgrund ihrer negativen Auswirkungen auf die ansteigende Stadtbevölkerung steht die Stadtplanung vor der Herausforderung, Maßnahmen zu entwickeln, mit denen sich der lokale Hitzestress für Menschen im Stadtquartier reduzieren lässt. Dafür liegen geeignete Ergebnisse aus zahlreichen human-biometeorologischen Untersuchungen vor, die über thermophysiologische Bewertungsindizes die qualitativ schon längst bekannten Effekte solcher Planungsmaßnahmen quantifizieren. Für Städte im mitteleuropäischen Binnenland erweist sich eine planerische Doppelstrategie als effektive Maßnahme zur Abschwächung von lokalem Hitzestress. Sie beruht auf der Reduzierung des Eintrags von Hitze in alle urbanen Räume tagsüber, vor allem durch Abschattung der direkten Sonnenstrahlung durch grüne Infrastruktur, und einer ausreichenden Ventilation. Diese Doppelstrategie lässt sich leichter bei Neuplanungen als bei Stadtsanierungen im bereits bestehenden Bestand realisieren.

Planning measures for the mitigation of local human heat stress: *Local heat stress, which is caused by the combined effect of changed atmospheric background conditions due to regional climate change and the dynamics in the urban development, is a burden especially for people in urban quarters, which were less confronted with it in the past, such as in Central European cities. Due to its negative impacts on the increasing urban population, urban planning is faced by the challenge to design measures for the reduction of local human heat stress within urban quarters. For this, suitable results from numerous human-biometeorological investigations are available, which quantify the qualitatively long-known impacts of such planning measures by thermo-physiological assessment indices. For Central European inland cities, a dual planning strategy represents an effective measure for the mitigation of local human heat stress. It is based on the reduction of the daytime heat input into all urban spaces, especially through the shading of the direct solar radiation by green infrastructure, and sufficient ventilation. This dual strategy is easier to implement in new planning than in urban renewal in already existing urban quarters.*

Die Diskussion von planerischen Maßnahmen zur Reduzierung von lokalem Hitzestress für Menschen bezieht sich hauptsächlich auf Städte, die bisher mit dem Phänomen »Hitzestress« weniger konfrontiert waren, wie z. B. in Mitteleuropa, aber jetzt infolge des regionalen Klimawandels vergleichsweise abrupt davon betroffen sind. Kennzeichnend dafür ist die Intensivierung von Hitzewellen im Sommer (Muthers & Matzarakis 2018), die in Mitteleuropa in den Jahren 2003, 2006, 2015, 2018 und 2019 zu beobachten war. Sie sind in eine langfristige Zunahme der bodennahen Lufttemperatur (T_a) eingebettet. Nach Analysen von Guerreiro et al. (2018) werden Hitzewellen in Mitteleuropa zukünftig häufiger auftreten, länger andauern und stärker ausgeprägt sein. Dadurch verändern sich die regionalen atmosphärischen Hintergrundbedingungen für Städte. Auf lokaler Ebene wird diese umweltmeteorologische Situation zusätzlich durch die Dynamik in der Entwicklung von Stadtquartieren modifiziert. Sie hat vielfältige Gründe, wie etwa die Bereitstellung von Wohnraum für die anwachsende Stadtbevölkerung, und äußert sich in Flächenumnutzungen, Innenentwicklungen, Verdichtungen und einem Anstieg der Flächenversiegelung einschließlich der daraus resultierenden energetischen und lufthygienischen Konsequenzen. Die veränderte umweltmeteorologische Situation in Stadtquartieren wirkt sich auf urbane Zielgruppen aus, unter denen die Stadtbevölkerung einen hohen Stellenwert hat, weil sie ebenso wie der Anteil der Senioren, die eine erhöhte thermophysiologische Vulnerabilität aufweisen, stetig ansteigt.

Generell stellen die umweltmeteorologischen Bedingungen in Städten eine Belastungssituation für die Stadtbevölkerung dar, die je nach individueller Konstitution, Gesundheit und Alter ein unterschiedlich hohes Ausmaß erreicht. Infolge der zunehmenden, intensiven Sommerhitze verstärkt sich die bisherige thermische Belastung zu Hitzestress, insbesondere in mitteleuropäischen Städten. Er beeinträchtigt erheblich das Wohlempfinden und die Leistungsfähigkeit der Stadtbevölkerung und verursacht eine erhöhte Morbidität bzw. sogar Mortalität, insbesondere bei Risikogruppen. Ausschlaggebend dafür ist, dass weder das Design noch die Bevölkerung in mitteleuropäischen Städten an extreme Hitze angepasst sind. Daraus ergibt sich ein rasanter Anstieg des Handlungsbedarfs in allen Planungsebenen, Methoden zu entwickeln, anzuwenden, auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen und gegebenenfalls nachzujustieren, mit denen sich die durch die regionalen Wetterbedingungen vorgegebene extreme Hitze, die zusätzlich durch das Stadtdesign intensiviert werden kann, langfristig lokal reduzieren lässt (Kuttler 2011). Da die Stadtbevölkerung im Handlungsfeld »Stadtplanung« die dominierende Zielgruppe bildet,

sollten diese Stadtplanungsmethoden auf Verfahren und Ergebnissen aus dem interdisziplinären Fachgebiet »urbane Human-Biometeorologie« (Mayer 1993, Holst & Mayer 2011, Lee 2015, Lee et al. 2016b) beruhen, damit ihre Auswirkungen, die qualitativ längst bekannt sind, in einer für Menschen relevanten Weise quantifiziert werden und damit eine höhere Bedeutung im planerischen Abwägungsprozess erzielen.

Thermophysiologische Bewertungsindizes

Untersuchungen in der urbanen Human-Biometeorologie zeigen auf, dass sich die Wahrnehmung von Hitze durch die Stadtbevölkerung über thermophysiologische Bewertungsindizes quantifizieren lässt, die auf der Energiebilanz des Menschen beruhen (Staiger et al. 2019). Einer davon ist die physiologisch äquivalente Temperatur (*PET*) (Mayer & Höppe 1987), die bisher weltweit sehr oft benutzt wurde (Mayer et al. 2008, Lee et al. 2013, 2016a, Müller et al. 2014, Taleghani et al. 2015, Kántor et al. 2018, Zölch et al. 2019). In den meisten Aufgaben der Stadtplanung sind die thermischen Bedingungen für Menschen in urbanen Räumen zu bewerten, nicht aber das thermisch gesteuerte Verhalten von Individuen (»Multiagenten«) in diesen Räumen. Deshalb wird dafür in der urbanen Human-Biometeorologie das Konzept der human-biometeorologischen Referenzperson in der stationären Form der Energiebilanz des Menschen angewandt, das Ergebnisse für thermophysiologische Bewertungsindizes liefert, die sich auf ein Kollektiv von Menschen beziehen (Mayer & Höppe 1987, Mayer 1993).

Um thermophysiologische Bewertungsindizes berechnen zu können, werden neben physikalischen Eigenschaften der human-biometeorologischen Referenzperson, wie z. B. Aktivität sowie Oberflächenalbedo und Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung, meteorologische Variablen als Eingangsgrößen benötigt (Mayer 1993, Mayer et al. 2008). Bezogen auf trockene Hitze an einem Sommertag handelt es sich dabei – in der Reihenfolge von höchster bis geringster Bedeutung – um (i) die mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}), die ein Maß für die von Menschen absorbierte kurz- und langwellige Strahlungswärme darstellt, T_a, die Windgeschwindigkeit (v) und den Wasserdampfdruck (VP).

Tab. 6.10-1: *Klassifizierung von PET-Bereichen in verschiedene warme Stufen der thermischen Empfindungen von Menschen an heißen Sommertagen unter Bezug auf die standardisierte thermische Empfindungsskala der American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers (ASHRAE 2008); Grundlage: human-biometeorologische Untersuchungen von Holst & Mayer (2010) in Freiburg (Südwestdeutschland)*

thermische Empfindungsskala nach ASHRAE		PET-Bereich (°C)
Bezeichnung	Skalenwert	
leicht warm	1	30 - 34
warm	2	35 - 40
heiß	3	> 40

Für eine geeignete Anwendung von Ergebnissen zum Hitzestress in der Stadtplanung ist es zweckmäßig, die Bereiche des angewandten thermophysiologischen Bewertungsindexes zu klassifizieren. Um lokale Adaptation und Akklimatisation der Stadtbevölkerung an Hitze zu berücksichtigen, sollte die Klassifizierung auf einem aufeinander abgestimmten Untersuchungsdesign aus geeigneten experimentellen Untersuchungen und Befragungen von Menschen beruhen, wie sie z. B. von Holst & Mayer (2010) für *PET* während Sommerbedingungen in Freiburg (Südwestdeutschland) durchgeführt wurden (*Tab. 6.10-1*). Danach nehmen Menschen die thermischen Bedingungen in städtischen Freiräumen von Freiburg dann als Hitzestress wahr, wenn $T_{mrt} > 55$ °C und $PET > 40$ °C sind. Infolge von Adaptation und Akklimatisation variiert die Zuordnung von *PET*-Bereichen zu thermischen Empfindungsklassen zwischen den einzelnen Klimazonen. Damit kann es für thermophysiologische Bewertungsindizes keine einheitliche Klassifizierung geben, die weltweit gültig ist.

Formen von Hitzestress im Stadtquartier

PET-Werte für mitteleuropäische Städte zeigen, dass Hitzestress für die Stadtbevölkerung im Sommer tagsüber in besonnten Bereichen städtischer Freiräume am höchsten ist (Mayer et al. 2008, Lee et al. 2014, Müller et al. 2014, Taleghani et al. 2015, Kleerekoper et al. 2017, Klok et al. 2019). Dennoch sind auch niedrigere *PET*-Werte in der Nacht nicht zu unterschätzen, weil sie auf eine dann geringere thermophysiologische Aktivität des menschlichen Körpers treffen (Mayer 1993). Für die Wirkung von Hitzestress auf die Stadtbevölkerung ist u. a. seine Andauer bedeutsam und inwieweit es zur Akkumulation von Hitzestress während aufeinanderfolgender Tage kommt. Kurzfristig können die lokalen Auswirkungen von Hitzestress auf Menschen in der Stadt durch Hitzewarnsysteme der nationalen Wetterdienste und ein an Hitze angepasstes, individuelles Verhalten der einzelnen Menschen eingeschränkt werden. Für eine langfristige, präventive Abschwächung von lokalem Hitzestress müssen stadtplanerische Methoden eingesetzt werden. Sie sollten

auf eine geeignete lokale Modifizierung der meteorologischen Eingangsvariablen abzielen, die die Wahrnehmung von Hitze durch Menschen beeinflussen. Damit besteht die Forderung nach einer Reduzierung von T_{mrt}, T_a und *VP* sowie einer Erhöhung von *v*.

Ob und inwieweit sich lokaler Hitzestress in Stadtquartieren überhaupt mit Planungsmethoden reduzieren lässt, hängt (i) von den verschiedenen Formen von Hitzestress und (ii) vom verfügbaren Planungsspielraum ab. Je nach der Höhe der Luftfeuchte in der Stadtatmosphäre an heißen Tagen unterscheidet man zwischen trockener Hitze und feuchter Hitze, die umgangssprachlich auch als »Schwüle« bezeichnet wird. Unter räumlicher Perspektive lässt sich zwischen Hitze in städtischen Freiräumen und Hitze in Innenräumen differenzieren. Da die Hitze in städtischen Freiräumen unmittelbar die Hitze in Innenräumen beeinflusst, führt jede Planungsmaßnahme, die primär auf die Reduzierung von lokalem Hitzestress in Freiräumen abzielt, sekundär zu einer Abschwächung von Hitzestress in Innenräumen. Dabei besteht bei klimaeffizienten Innenräumen die Chance, auf elektrisch betriebene Klimaanlagen in Innenräumen so weit wie möglich zu verzichten, da sie den Zielen des Klimaschutzes widersprechen. Hinsichtlich von zeitlichen Aspekten ist zwischen der Hitze während des Tages und der Hitze in der Nacht zu trennen. Wenn es durch planerische Maßnahmen gelingt, den Hitzeeintrag in städtische Räume während des Tages zu reduzieren, wird für die Nacht eine niedrigere thermische Ausgangssituation erreicht.

Doppelstrategie von planerischen Maßnahmen zur Reduzierung von lokalem Hitzestress in mitteleuropäischen Städten

Extreme Hitze, die bei Menschen thermischen Stress verursacht, tritt in mitteleuropäischen Städten im Sommer auf, d. h. in einer Jahreszeit, in der die Länge des Tages größer als die Länge der Nacht ist. Dadurch ist eine Doppelstrategie von Planungsmaßnahmen in Städten zweckmäßig, die zur Aufrechterhaltung von lokalem thermischem Komfort für Menschen in urbanen Räumen führt. Erste Priorität haben alle Maßnahmen, die auf die Tagsituation fokussiert sind und zu einer Reduzierung des Eintrags von Hitze in alle urbanen Räume führt. Maßnahmen mit dem Ziel, den während der Nacht noch vorhandenen Hitzestress in urbanen Räumen abbauen, haben eine zweite Priorität.

Vor dem Hintergrund aus Erkenntnissen in der urbanen Human-Biometeorologie, nach denen die Abschattung der direkten Sonnenstrahlung und die Sicherung einer ausreichenden Belüftung quantitativ am effektivsten sind, um lokalen Hitzestress für Menschen zu reduzieren, resultiert daraus für mitteleuropäische Städte, dass tagsüber durch die Abschattung der direkten Sonnenstrahlung am ehesten eine Reduzierung des Hitzeeintrags in urbane Räume (*Tab. 6.10-2*) erzielt werden kann (Mayer et al. 2008; Holst & Mayer 2011; Lee et al. 2013). Die Lage und Größe der abgeschatteten Flächen hängen vom Zusammenwirken (i) der Dimension und Exposition des Schattenspenders sowie

Maßnahmen		urbane Räume	
		Freiräume	Innenräume
technische Einrichtungen	Sonnenschirme	+	+
	Sonnensegel	+	+
	Markisen	+	+
Gebäude	Höhe	+	0
	Orientierung	+	+
	Baumaterialien	0	+
	weiße Dächer	-	+
	weiße Fassaden	-	+
grüne Infrastruktur	Dachbegrünung	-	+
	Fassadenbegrünung	+	+
	grüne Gleise	0	-
	Grasflächen	0	-
	Straßenbäume	++	+
	aufgelockerte Parks	++	-
	Vorgärten	0	+

Tab. 6.10-2: *Maßnahmen zur Abschattung der direkten Sonnenstrahlung, um Hitzestress für Menschen zu reduzieren, einschließlich ihrer qualitativen Bewertung (»-«: unwirksam, »0«: leicht wirksam, »+«: wirksam, »++«: sehr wirksam).*

(ii) der Sonnenhöhe ab, d. h. sie sind zeitlich variabel. Individuell eignen sich dafür technische Einrichtungen wie Markisen und Sonnenschirme. Unter Planungsaspekten sind Gebäudeeigenschaften von Bedeutung. Dazu zählen direkte Kennzeichen wie ihre räumlichen Anordnung, Höhe, Bauweise und Baumaterialien sowie die Umgebungssituation als indirektes Merkmal. Charakteristisch dafür sind u. a. das Verhältnis von Höhe (*H*) der Randbebauung zur Breite (*W*) von Straßenschluchten (aspect ratio *H/W*) oder der Himmelssichtfaktor (*SVF*), der den sichtbaren Bereich der Himmelshemisphäre über einem Standort angibt, der nicht durch Gebäude oder Bäume beeinträchtigt ist. Arkaden stellen ein typisches Beispiel für Gebäudeeigenschaften dar, die zur lokalen Reduzierung von Hitzestress für Fußgänger führen (*Abb. 6.10-1*). Weiße Hausfassaden, wie sie aus dem mediterranen Raum bekannt sind, wirken sich stressmindernd in Innenräumen aus, führen allerdings aufgrund ihrer hohen Oberflächenalbedo zu einer Erhöhung von Hitzestress in städtischen Freiräumen, die besonders prägnant ist, wenn die weißen Hausfassaden direkt von der Sonne bestrahlt werden (Lee & Mayer 2018a). Daher sind sie nur für Gebäude am Rand von tiefen Straßenschluchten ($H/W > 3$) zweckdienlich.

In mitteleuropäischen Städten tritt Hitzestress während Wetterlagen auf, in denen die regionale Windgeschwindigkeit vergleichsweise niedrig ist. Daher ist es tagsüber bei Städten im Binnenland kaum möglich, über eine Erhöhung von *v* die ausreichende Belüftung von Stadtquartieren zu erreichen. Städte an der Küste profitieren jedoch vom tagsüber herrschenden Seewind. Während der Nacht erfolgt bei Städten, die sich in einer komplexen topographischen Lage befinden, eine Zufuhr von Frisch- und Kaltluft über lokale und regionale Zirkulationssysteme. Städte in ebener Lage werden nachts durch den Flurwind belüftet, wobei allerdings seine Wirksamkeit vor dem Hintergrund der unregelmäßig erhöhten aerodynamischen Oberflächenrauigkeit von Stadtquartieren noch diskutiert wird.



Abb. 6.10-1: *Beispiel für Arkaden (Mühldorf am Inn; Foto: H. Mayer).*

Wasserflächen sind zur Abschwächung von thermischem Stress für Stadtbewohner relativ unwirksam, weil die direkte Sonnenstrahlung dadurch nicht abgeschattet und somit T_{mrt} kaum reduziert wird. Ihre Verdunstung erniedrigt zwar lokal T_a, jedoch nur in einem geringen Ausmaß (kleiner als 1 K) und nur in einem vergleichsweise geringen Randbereich um die Wasserflächen. Die Erhöhung von *VP* durch die Wasserverdunstung konterkariert sogar den angestrebten Abbau von thermischem Stress.

Grüne Infrastruktur als planerische Maßnahme zur Reduzierung von lokalem Hitzestress

Zu den vielfältigen positiven Eigenschaften von grüner Infrastruktur für die Stadtbevölkerung zählt die Abschwächung von Hitzestress im Stadtquartier. Über Dachbegrünungen lassen sich in Analogie zu weißen Flachdächern vor allem thermische Belastungen für Menschen in Innenräumen abbauen. Dachbegrünungen haben jedoch keinen Einfluss auf den Hitzestress, dem Fußgänger in städtischen Freiräumen ausgesetzt sind. Demgegenüber bewirken Fassadenbegrünungen tagsüber nicht nur eine Abschwächung von thermischem Innenraumstress, sondern tragen aufgrund ihrer relativ niedrigen Oberflächenalbedo auch zu einer Reduzierung der thermischen Belastung in städtischen Freiräumen, insbesondere in Straßenschluchten, bei.

Zahlreiche experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen quantifizieren die Erfahrung der Stadtbevölkerung, dass Bäume den Typ von grüner Infrastruktur darstellen, mit dem sich Hitzestress über die Abschattung der direkten Sonnenstrahlung am effektivsten reduzieren lässt (Holst & Mayer 2011, Lee et al. 2013, Kántor et al. 2018, Lee & Mayer 2018b, Aminipouri et al. 2019, Zölch et al. 2019). Die Wirksamkeit des Abschattungseffekts durch Bäume (*Abb. 6.10-2* und *6.10.3*) hängt im Wesentlichen von ihrem Standort, ihrer Anzahl und Dimension sowie Blattflächendichte ab. Gegenüber Gebäuden, die ebenfalls einen thermischen

Abschattungseffekt aufweisen, der etwas geringer als bei Bäumen ist (Lee et al. 2013), üben Bäume neben weiteren Ökosystemdienstleistungen und visuellen Vorteilen für die Stadtbevölkerung zusätzlich eine Transpirationskühlung aus, auch wenn sie in ihrer Wirkung im Vergleich zum Abschattungseffekt relativ gering ist.

Aus der Analyse von Ergebnissen experimenteller Untersuchungen in verschiedenen Stadtquartieren von Freiburg, die im Rahmen des KLIMES-Projektes an typischen Sommertagen von 2007 bis 2010 durchgeführt wurden (Mayer et al. 2008, Holst & Mayer 2011, Lee 2015), folgt, dass an den Untersuchungsstandorten eine Reduzierung von *SVF* um 10 % durch die Kronen von adulten Bäumen eine Erniedrigung von T_a um maximal 0,2 K, von T_{mrt} um maximal 3,8 K und von *PET* um maximal 1,4 K bewirkte. Das bedeutet, dass zum Zeitpunkt des höchsten täglichen Hitzestresses eine komplette Abschattung des Standortes durch Baumkronen, d. h. *SFV* = 0 %, zu einer lokalen Reduzierung des Hitzestresses für Fußgänger um ca. zwei Stufen, von »heiß« zu »leicht warm« auf der thermischen ASHRAE Empfindungsskala führte.



Abb. 6.10-2: *Beispiel für die Abschattungswirkung eines adulten Laubbaums (Freiburg; Foto: H. Mayer).*



Abb. 6.10-3: *Beispiel für die Abschattungswirkung eines grünen Kronendachs von Laubbäumen (Seoul, Südkorea; Foto: H. Mayer).*

Über numerische Simulationen mit dem ENVI-met Modell, Version 4.0 BETA (Simon 2016), konnte für verschiedene Konversionsflächen in Stuttgart mit einer Ausdehnung zwischen 1,6 und 4,2 ha das maximale Potenzial von grüner Infrastruktur in Form eines savannenartigen Parks zur Abschwächung von Hitzestress an einem typischen mitteleuropäischen Hitzewellentag, der die zukünftige Hitzesituation im Sommer repräsentiert, ermittelt werden (Lee & Mayer 2018b). Als Referenz diente die hypothetische Umgestaltung der Konversionsflächen in reine Asphaltflächen. Gemittelt über den Zeitraum 10 bis 16 Uhr MEZ und die gesamten untersuchten Konversionsflächen ergab sich eine maximale Erniedrigung von T_a um 1 K, T_{mrt} um 18 K und *PET* um 8 K. Diesem Reduktionspotenzial liegt eine mittlere Windgeschwindigkeit von 1,1 m/s in 10 m Höhe zugrunde, die auf lokalen Messdaten beruht. Sie kann als repräsentativ für den gewählten Zeitraum an einem Hitzewellentag in einer mitteleuropäischen Stadt im Binnenland aufgefasst werden.

Die geeignete Anordnung von Bäumen zur effektiven Reduzierung von lokalem Hitzestress für die Stadtbevölkerung richtet sich nach der Standortsexposition. Bezogen auf den ganzen Tag ist die Notwendigkeit zur Abschattung der direkten Sonnenstrahlung auf dem nach Süden exponierten Bürgersteig von Ost-West orientierten Straßenschluchten am größten. Numerische Simulationen mit dem ENVI-met Modell für den gleichen mitteleuropäischen Hitzewellentag ergaben für drei große Bäume (Platanen; Baumhöhe: 14 m, Kronenhöhe: 11 m, Kronenbreite: 7 m) auf einem nach Süden exponierten Bürgersteig (Länge: 90 m und Breite: 4 m) eine Abschwächung der thermischen Bedingungen für Fußgänger, die – gemittelt über den Zeitraum 10 bis 16 Uhr MEZ und die gesamte Fläche des Bürgersteigs – 0,1 K für T_a, 5,2 K für T_{mrt} und 2,1 K für *PET* betrug. Bei fünf großen Bäumen erhöhte sich die Reduzierung von T_a auf 0,2 K, von T_{mrt} auf 10,3 K und von *PET* auf 4,2 K. Diese Resultate beziehen sich auf eine Ost-West orientierte Straßenschlucht mit H/W = 0,5. Bei einer tieferen Straßenschlucht mit H/W = 2,0 erreichten die Abschwächungen der drei Variablen ein etwas geringeres Ausmaß.

Diese exemplarischen Resultate zeigen bereits die Vielfalt der Möglichkeiten auf, die Bedeutung von Bäumen als planerische Maßnahme für die Reduzierung von lokalem Hitzestress zu untersuchen. Das quantitative Ausmaß der Hitzeabschwächung hängt u.a. vom räumlichen und zeitlichen Bezug ab. Bei der räumlichen Anordnung von Bäumen ist zu beachten, dass sie als Strömungshindernis mit negativen Konsequenzen für die lokale Luftqualität wirken, und zwar umso mehr, je größer ihre räumliche Dichte ist. Savan-

nenartig gestaltete Parkflächen in Stadtquartieren haben zusätzlich den Vorteil, dass die nächtliche Erniedrigung der bodennahen Lufttemperatur durch die langwellige Strahlungsbilanz nur marginal eingeschränkt ist.

Bei der Auswahl von vitalen Baumarten in der Stadt ist darauf zu achten, dass es sich in Bezug auf die Freisetzung von biogenen Kohlenwasserstoffen um sogenannte »*low emitter*« Baumarten (Kuttler 2011) handelt, die an die Erscheinungsformen des regionalen Klimawandels angepasst sind. Außerdem sollte ihre Nährstoff- und Wasserversorgung über möglichst natürliche Art gewährleistet sein.

Schlussfolgerungen

Der durch das regionale Wettergeschehen vorgegebene und durch das Stadtdesign sowie die Stadtentwicklung intensivierte Hitzestress für die Stadtbevölkerung, insbesondere in mitteleuropäischen Städten, wird zukünftig ein Ausmaß erreichen, das die Stadtplanung herausfordert, jetzt schon auf präventive Weise Maßnahmen zu entwickeln und anzuwenden, die zu einer lokalen Reduzierung dieser ernsten Gesundheitsgefährdung führen. Solche Maßnahmen, die im Übrigen auch den Klimaschutz fördern, sollten sich auf verschiedene Planungsebenen beziehen, d. h. sowohl auf die Stadtsanierung im Bestand als auch auf den Neubau von einzelnen Gebäuden bis zur Bauleitplanung für neue Stadtteile, wobei die planerischen Gestaltungsmöglichkeiten bei Stadtsanierungen limitiert sind. Aufgrund der verschiedenen Formen von Hitzestress für die Stadtbevölkerung ist eine Priorisierung von planerischen Maßnahmen zur Abschwächung von Hitzestress im Stadtquartier zweckmäßig. Auf jeden Fall sollten sie aber auf den zentralen Bausteinen »Abschattung der direkten Sonnenstrahlung« und »Sicherung einer ausreichenden Ventilation« beruhen, wie es z. B. in der Doppelstrategie zum Ausdruck kommt.

Literatur

AMINIPOURI M., D. RAYNER, F. LINDBERG et al. (2019): Urban tree planting to maintain outdoor thermal comfort under climate change: The case of Vancouver's local climate zones. Building and Environment 158, 226-236.

ASHRAE (2008): Proposed addendum d to standard 55-2004 (Thermal Environmental conditions for human occupancy). Public Review Draft, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers.

GUERREIRO S. B., R. J. DAWSON, C. KILSBY et al. (2018): Future heatwaves, droughts and floods in 571 European cities. Environmental Research Letters 13 034009.

HOLST J. & H. MAYER (2010): Urban human-biometeorology: Investigations in Freiburg (Germany) on human thermal comfort. Urban Climate News 38: 5-10.

HOLST J. & H. MAYER (2011): Impacts of street design parameters on human-biometeorological variables. Meteorologische Zeitschrift 20(5): 541-552.

KÁNTOR N., L. CHEN & C. V. GÁL (2018): Human-biometeorological significance of shading in urban public spaces - Summertime measurements in Pécs, Hungary. Landscape and Urban Planning 170: 241-255.

KLEEREKOPER L., M. TALEGHANI, A. van den DOBBELSTEEN & T. HORDIJK (2017): Urban measures for hot weather conditions in a temperate climate condition: A review study. Renewable and Sustainable Energy Reviews 75: 515-533.

KLOK L., N. ROOD, J. KLUCK & L. KLEEREKOPER (2019): Assessment of thermally comfortable urban spaces in Amsterdam during hot summer days. International Journal of Biometeorology 63(2): 129-141.

KUTTLER W. (2011): Climate change in urban areas, Part 2, Measures. Environmental Sciences Europe 23:21, 15 pages.

LEE H. (2015): Increasing heat waves require human-biometeorological analyses on the planning-related potential to mitigate human heat stress within urban districts. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. *https://freidok.uni-freiburg.de/fedora/objects/freidok:10428/datastreams/FILE1/content* (31. Juli 2019).

LEE H. & H. MAYER (2018a): Thermal comfort of pedestrians in an urban street canyon is affected by increasing albedo of building walls. International Journal of Biometeorology 62(7): 1199-1209.

LEE H. & H. MAYER (2018b): Maximum extent of human heat stress reduction on building areas due to urban greening. Urban Forestry & Urban Greening 32: 154-167.

LEE H., J. HOLST & H. MAYER (2013): Modification of human-biometeorologically significant radiant flux densities by shading as local method to mitigate heat stress in summer within urban street canyons. Advances in Meteorology, article ID 312572, 13 pages.

LEE H., J. HOLST & H. MAYER (2013): Modification of human-biometeorologically significant radiant flux densities by shading as local method to mitigate heat stress in summer within urban street canyons. Advances in Meteorology, article ID 312572, 13 pages.

LEE H., H. MAYER & D. SCHINDLER (2014): Importance of 3-D radiant flux densities for outdoor human thermal comfort on clear-sky summer days in Freiburg, Southwest Germany. Meteorologische Zeitschrift 23(3): 315-330.

LEE H., H. MAYER & L. CHEN (2016a): Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. Landscape and Urban Planning 148: 37-50.

LEE H., A. OERTEL, H. MAYER et al. (2016b): Evaluation method for the human-biometeorological quality of urban areas facing summer heat. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 76(7/8): 275-282.

MAYER H. (1993): Urban bioclimatology. Experientia 49(11), 957-963.

MAYER H. & P. HÖPPE (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. Theoretical and Applied Climatology 38(1): 43-49.

MAYER H., J. HOLST, P. DOSTAL et al. (2008): Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. Meteorologische Zeitschrift 17(3): 241-250.

MÜLLER N., W. KUTTLER & A.B. BARLAG (2014): Counteracting urban climate change: adaptation measures and their effect on thermal comfort. Theoretical and Applied Climatology 115(1-2), 243-257.

MUTHERS S. & A. MATZARAKIS (2018): Hitzewellen in Deutschland und Europa. In: Lozán, J. L. S.-W. Breckle, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.). Warnsignal Klima: Extremereignisse. pp. 83-91.

SIMON H. (2016): Modeling urban microclimate - development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met. Dissertation, Jo-hannes Gutenberg-Universität Mainz, *https://publications.ub.uni-mainz.de/theses/volltexte/2016/ 100000507/pdf/100000507.pdf* (31. Juli 2019).

STAIGER H., G. LASCHEWSKI & A. MATZARAKIS (2019): Selection of Appropriate Thermal Indices for Applications in Human Biometeorological Studies. Atmosphere 10, 18, 15 pages.

TALEGHANI M., L. KLEEREKOPER, M. TENPIERIK & A. van den DOBBELSTEEN (2015): Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. Building and Environment 83: 65-78.

ZÖLCH T., M. A. RAHMAN, E. PFLEIDERER et al. (2019): Designing public squares with green infrastructure to optimize human thermal comfort. Building and Environment 149: 640-654.

Kontakt:

Dr. Hyunjung Lee
Amt für Umweltschutz, Stuttgart - Abt. Stadtklimatologie
Hyunjung.Lee@stuttgart.de

Prof. Dr. Helmut Mayer i.R.
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Umweltmeteorologie
helmut.mayer@meteo.uni-freiburg.de

Lee, H. & H. Mayer (2019): Planerische Maßnahmen zur Reduzierung von lokalem Hitzestress für Menschen. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 263-268. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.38.

6.11 INKAS - ein vielseitiges Klimaberatungswerkzeug für die Stadtentwicklung

Saskia Buchholz

Aufgrund der hohen Bebauungs- und Bevölkerungsdichte sowie der komplexen Struktur und Versorgungssysteme sind Städte besonders vulnerabel gegenüber extremen Wetterereignissen. Der durch den Klimawandel bedingte Anstieg in der Häufigkeit, Dauer und Intensität von Hitzeepisoden wird sich voraussichtlich über dieses Jahrhundert hinaus fortsetzen und die Gefahr für Hitzestress der Stadtbewohner weiter steigern. Die Stadtentwicklung muss deshalb heute schon die Auswirkungen des Klimawandels für die kommenden Dekaden berücksichtigen. Stadtplaner und Entscheidungsträger benötigen hierzu Informationen über die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen, um ihre Optionen zu priorisieren. Um alle Städte bei der Umsetzung geeigneter Maßnahmen zur Klimaanpassung zu unterstützen, stellt der Deutsche Wetterdienst (DWD) das Beratungswerkzeug INKAS (Informationsportal Klimaanpassung in Städten) als entgeltfreien Stadtklimaservice unter der Adresse www.dwd.de/inkas bereit. Mit Hilfe von INKAS können für verschiedene Bebauungstypen die Auswirkungen unterschiedlicher städtebaulicher Maßnahmen zur Minderung der städtischen Überwärmung in wenigen Schritten analysiert und verglichen werden.

INKAS – A guidance tool for heat resilient urban planning: *Due to high building and population density, as well as complex infrastructures and supply systems, urban areas are particularly vulnerable to extreme weather events. The climate change induced increase in the frequency, duration and intensity of heat waves is expected to continue beyond the end of this century and is raising the threat of heat stress of city dwellers. Therefore, today's urban planning has to consider the impact of climate change expected in upcoming decades. To do this, urban planners, practitioners and decision-makers require knowledge about the effectivity of city-scale climate adaptation measures to prioritize their options. For this purpose the German Meteorological Service (DWD) developed the INKAS (Information Portal for Climate Adaptation in Cities) guidance tool to assess and compare the quantitative effect of different adaptation measures for heat load mitigation in various urban settlement types and for varying degrees of implementation. INKAS is freely accessible on the DWD website at www.dwd.de/inkas.*

Jede Modifikation der natürlichen Landbedeckung und ihrer physikalischen Eigenschaften führt zu lokalen bis hin zu regionalen Veränderungen des Klimas (Hartmann et al 2013). Das Stadtklima ist hierfür ein gutes Beispiel. Die Vielzahl an Gebäuden, der versiegelte Straßenraum, der verringerte Anteil natürlicher Vegetation und die Emissionen von Wärme und Luftschadstoffen ändern das Lokalklima (Kuttler 2004). Die Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung, der Wind und Niederschlag sind hiervon betroffen. Am auffälligsten ist die als städtische Wärmeinsel bekannte Erhöhung der städtischen Lufttemperatur im Vergleich zum Umland. Gebäude und sonstige versiegelte Flächen speichern tagsüber eine große Menge der eingestrahlten Sonnenenergie. Diese wird in den Abend- und Nachtstunden langsam wieder abgegeben und verhindert dadurch eine schnelle Abkühlung der bodennahen Luftschicht in der Stadt (Oke et al. 2017). Somit können die Lufttemperaturunterschiede zum Umland in großen Metropolen bei günstigen meteorologischen Bedingungen (windschwache Strahlungsnacht) bis zu 10 Kelvin betragen (LANUV 2013). Aber auch innerhalb einer Stadt können sich verschiedene großmaßstäbliche Lokalklimate in Abhängigkeit von der Bebauungsdichte, Versiegelung und dem Vegetationsanteil ausbilden (s. Kap. 1.1 Kuttler - in diesem Band).

Die Auswirkungen der städtischen Wärmeinsel sind vielfältig. Trotz der positiven Effekte durch Einsparungen des Heizenergiebedarfs im Winter (Santamouris et al. 2001) und der teils länger andauernden Vegetationsperiode (Jochner & Menzel 2015) birgt die städtische Wärmeinsel auch Risiken für die Bevölkerung, Infrastruktur und Umwelt. Diese treten in Deutschland insbesondere während langanhaltender sommerlicher Hitzeepisoden auf. Vor allem die Gesundheit und Produktivität der Stadtbevölkerung kann deutlich beeinträchtigt werden (Gabriel & Endlicher 2011). Dies betrifft vor allem ältere Menschen, chronisch Kranke, Schwangere und Kleinkinder. Sie können sich häufig nur unzureichend an die erhöhte Hitzebelastung anpassen. Hitze in Verbindung mit langanhaltender Trockenheit schadet außerdem den städtischen Ökosystemen und der Biodiversität und führte z. B. im Sommerhalbjahr 2018 und 2019 zu großflächigen Trockenschäden an Stadtbäumen.

Hitzevorsorge in urbanen Räumen

In der Vergangenheit war das Thema Hitzebelastung und -vorsorge nur für wenige deutsche Kommunen von Bedeutung (UBA 2019). Die fortschreitende Klimaerwärmung und damit verbunden die Zunahme in der Häufigkeit, Dauer und Intensität von Hitzeepisoden führt jedoch dazu, dass sich auch bisher wenig oder nicht betroffene Kommunen an die Folgen des Klimawandels anpassen und Hitzevorsorge betreiben müssen. Im Mittelpunkt steht die kommunale Klimaanpassungsstrategie, die Instrumente und Maßnahmen definiert, um die klimawandelbedingten Risiken für

Bürger, Unternehmen, die öffentliche Infrastruktur sowie Natur und Umwelt zu minimieren. Eine besonders wichtige Rolle bei der kommunalen Klimaanpassung an Hitze spielen Maßnahmen der Stadtentwicklung, die der thermischen Aufheizung in der Stadt entgegenwirken. Dazu gehören die Freihaltung von Entstehungsgebieten und Transportpfaden von Kalt- und Frischluft sowie der Erhalt, die Erweiterung und die Neuanlage von Grün- und Wasserflächen (z. B. begrünte Straßen, Fassaden und Dächer). Daneben tragen auch die Entsiegelung oder die Verwendung heller d. h. stärker rückstrahlender Materialien und Oberflächen zur Hitzereduktion bei. Die Verwendung heller Materialien und Anstriche an Häuserwänden kann aber mitunter nicht erwünschte Effekte wie die Erhöhung der Strahlungsbelastung für Personen im Straßenraum haben (Lee & Mayer 2018).

Welche Maßnahme verspricht den größten Nutzen, wenn es darum geht, das Stadtklima zu verbessern und der Hitze im Stadtquartier entgegenzuwirken? Denn nicht alle Anpassungsmaßnahmen wirken überall gleich gut und es gibt tageszeitliche Unterschiede.

Um strategische Entscheidungen hinsichtlich einer Anpassungsmaßnahme treffen zu können, wird auf modellbasierte Stadtklimauntersuchungen zurückgegriffen. Denn mithilfe numerischer Computersimulationsmodelle können Änderungen des Lokalklimas aufgrund von städtebaulichen Maßnahmen berechnet, Kaltluftanalysen ermittelt und Aussagen zum zukünftigen Stadtklima gemacht werden. Solche individuellen Stadtklimasimulationen sind jedoch mit einem hohen finanziellen und personellen Aufwand verbunden. Oftmals wird die Erstellung einer Stadtklimaanalyse selbst als Maßnahme der Klimaanpassungsstrategie formuliert, sodass ihre Ergebnisse erst bei der Fortschreibung der Klimaanpassungsstrategie berücksichtigt werden können.

INKAS- eine interaktive Entscheidungshilfe

Das interaktive Online-Beratungswerkzeug des DWD namens INKAS (Informationsportal Klimaanpassung in Städten) unterstützt die Kommunalverwaltungen, Stadtplaner/-innen und Architekten/-innen dabei, die thermische Wirkung unterschiedlicher städtebaulicher Maßnahmen einzuschätzen und zu vergleichen. Grundlage bildet eine Datenbank mit Ergebnissen aus mehr als 3.200 Computersimulationen idealisierter Städte. Die INKAS Ergebnisse können entsprechend eigener Fragestellungen für verschiedene Bebauungstypen, -umgebungen und Anpassungsmaßnahmen angezeigt werden. INKAS umfasst derzeit die zwei Werkzeuge »Flächenanalyse« und »Wirkungsanalyse«, deren Anwendung im Folgenden kurz dargestellt wird.

Flächenanalyse

Um die Belastung der städtischen Bevölkerung gegenüber Hitze zu bestimmen, werden unter anderem Informationen zur Dichte der Bebauung und zum Versiegelungsgrad benötigt, da diese maßgeblich zur Ausbildung der städtischen Wärmeinsel beitragen.

Die Frage nach charakteristischen Bebauungstypen, die im Sommer hitzebelastet sind und somit bereits unter aktuellen Klimabedingungen von der Klimaanpassung profitieren können, kann mit dem INKAS Werkzeug »Flächenanalyse« untersucht werden. Die sommerliche Hitzebelastung wird für neun in Deutschland vorkommende Bebauungstypen (*Tab. 6.11-1*, BMBAU 1980) anhand der Lufttemperatur und der Gefühlten Temperatur - als ein Maß für das Temperaturempfinden des Menschen (Staiger et al. 2012) - dargestellt. Die diesem Werkzeug zu Grunde liegenden Modellrechnungen basieren auf der Änderung von drei Flächenanteilen, die jedem städtischen Bebauungstyp zugeordnet werden. Das sind erstens der Flächenanteil der Gebäude, zweitens der Anteil der sonstigen, versiegelten Fläche und drittens der Anteil der unversiegelten Fläche zwischen der Bebauung. Die Ergebnisse werden in Dreiecksdiagrammen oder Tabellen für jeden Bebauungstyp einzeln oder als Zusammenschau aller Modellergebnisse verfügbar gemacht.

Um das Werkzeug anwenden zu können, muss der Nutzer wissen, welcher Bebauungstyp dem zu untersuchenden Stadtquartier zu Grunde liegt. Die Auswahl über ein Dropdown-Menü wird mit Hilfe einer Abbildung und Beschreibung zusätzlich erleichtert. Das Hinzuziehen von georeferenzierten Luftbildern kann die Zuordnung weiter vereinfachen, da aus ihnen eine erste subjektive Abschätzung zu den drei Flächenanteilen möglich ist.

Der Ansatz über die zu wählenden Bebauungstypen gleicht dem Ansatz der Nutzung von urbanen Klimatopen und kann für ein erstes Screening der Überwärmung von Stadtquartieren herangezogen werden. Die Ergebnisse zeigen die Abhängigkeiten der Hitzebelastung vom Flächenanteil der Gebäude, dem Anteil der sonstigen versiegelten Fläche und unversiegelten Fläche zwischen der Bebauung. Für Zwecke der Bauleitplanung lassen sich aus der Zusammenschau aller Modellergebnisse – sowohl der Lufttemperatur als auch der Gefühlten Temperatur - kritische Bereiche und Schwellwerte ableiten (*Abb. 6-12-1*). So sollte die Fläche, die Gebäude einnehmen, 40 % nicht überschreiten, da sonst eine hohe Wärmebelastung droht. Die Modellergebnisse zeigen auch, dass der Anteil unversiegelter Flächen (z. B. Grünflächen) nicht unter 20 % fallen sollte, da dann ebenfalls mit einer erhöhten Wärmebe-

lastung gerechnet werden muss (Buchholz & Kossmann 2015). Stadtquartiere, die mehr als 40 % bebaute Fläche und weniger als 20 % Grünflächen aufweisen, sind besonders stark wärmebelastet und sollten bei der Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen die höchste Priorität bekommen.

Wirkungsanalyse

Um eine erfolgreiche Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu erreichen, ist es wichtig, die Maßnahmen herauszufiltern, die am besten geeignet sind, die Hitzebelastung in überwärmten Stadtquartieren zu senken. Neben der Flexibilität, Nachhaltigkeit, Machbarkeit und den positiven Nebeneffekten einer Maßnahme ist insbesondere deren Wirksamkeit ein wichtiges Bewertungskriterium (UBA 2016). Denn nur wenn die Maßnahme auch geeignet ist, zum Beispiel die sommerliche Hitzebelastung im Stadtquartier zu reduzieren, kann überhaupt ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis erreicht werden.

Wie effektiv kann die Lufttemperatur bei Anwendung einer Anpassungsmaßnahme gesenkt werden? Welche Anpassungsmaßnahme ist am besten geeignet, die sommerliche Hitzebelastung in einer bestimmten Bebauung zu reduzieren (Maßnahmenvergleich)? Antworten auf diese Fragen liefert das INKAS Werkzeug »Wirkungsanalyse«. Es können Anpassungsmaßnahmen aus den zwei Kategorien Bebauungs- und Oberflächeneigenschaften oder Grün- und Wasserflächen gewählt werden (*Tab. 6-12-1*). Neben den Anpassungsmaßnahmen sind auch zwei Simulationsexperimente zur Stadtentwicklung (Veränderung des

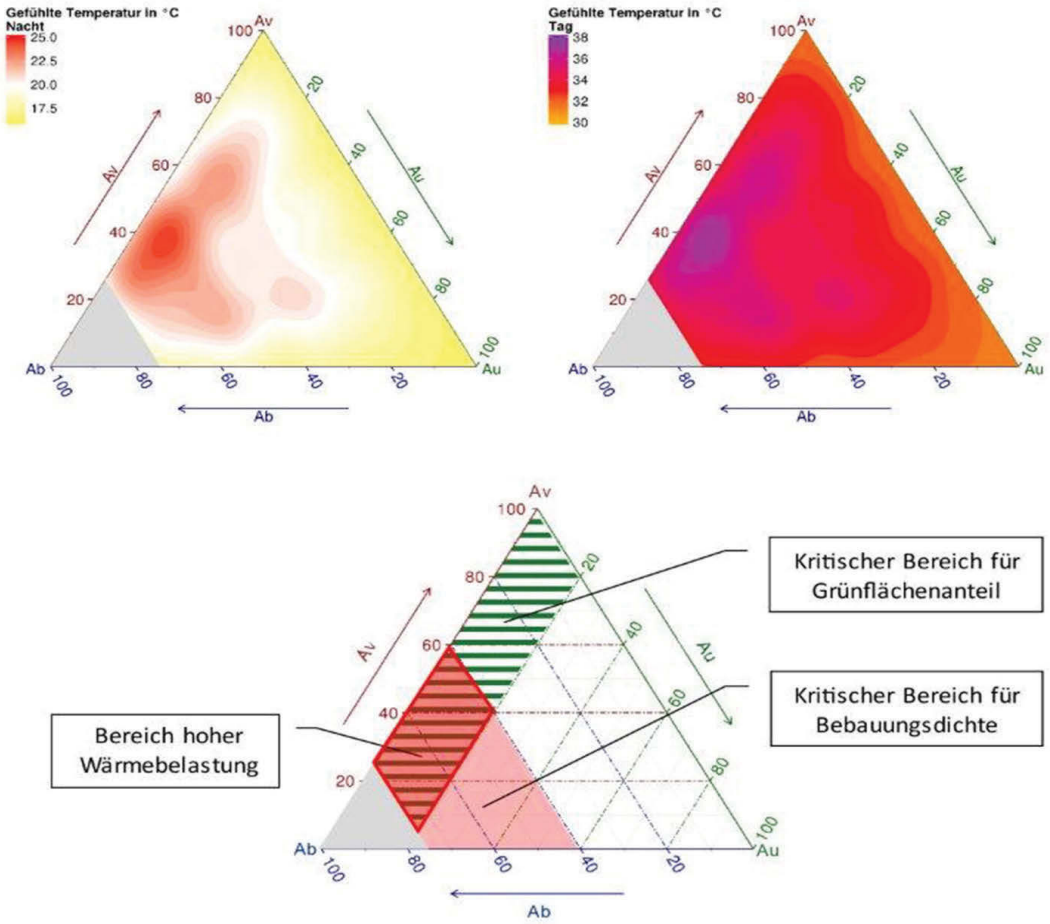


***Abb. 6.11-1**: Zusammenschau aller Modellergebnisse für die Gefühlte Temperatur (oben) und abgeleitete kritische Bereiche und Schwellwerte (unten). Der Flächenanteil der Bebauung wird durch die blaue Achse (Ab), der Flächenanteil der sonstigen versiegelten Fläche wird durch die rote Achse (Av) und der Flächenanteil der unversiegelten Fläche wird durch die grüne Achse (Au) symbolisiert. Für den Wertebereich, Ab größer als 75 %, ist keine Interpretation möglich, da keine Modelldaten zur Verfügung stehen.*

Abb. 6.11-2: *INKAS Bildschirmanzeige für das im Text erläuterte Beispiel zur Entsiegelung von Innenhöfen in einem Quartier mit Blockrandbebauung. Die Ergebnisse der Wirkungsanalyse werden als Punktdiagramm dargestellt. Das zusätzliche Wirkungsdiagramm gibt Hinweise wie die Anpassungs- oder Stadtentwicklungsmaßnahme bei den gewählten Optionen bezüglich ihrer Wirkung auf die Lufttemperatur in der Stadt zu bewerten ist. Zwei verschiedene Symbole kennzeichnen die Wirksamkeit am Tag (Sonne) und in der Nacht (Mond). Die Farbgebung gibt an, ob die Maßnahme vorteilhaft (grün), nachteilig (rot) oder von neutraler beziehungsweise variabler Wirkung (grau) ist.*

Grundflächenanteils der Gebäude und der mittleren Gebäudehöhe) enthalten. Die Ergebnisse geben beispielsweise einen ersten Hinweis darüber, ob bei einer Nachverdichtung im Bestand (Grundflächenanteil der Gebäude wird erhöht) oder bei einer Aufstockung von Gebäuden (mittlere Gebäudehöhe steigt) mit negativen Auswirkungen auf die Lufttemperatur zu rechnen ist. Zu bemerken ist, dass die INKAS Ergebnisse nur einen Planungshinweis geben und kein stadtklimatisches Gutachten ersetzen können.

Wie die INKAS-Wirkungsanalyse für bestimmte Fragestellungen genutzt werden kann, zeigt folgendes Beispiel: Ein nahe der Innenstadt gelegenes Stadtquartier mit überwiegender Blockrandbebauung (32 % der Fläche sind Gebäude mit einer mittleren Höhe von 19 m) wurde als Areal mit besonders hoher Wärmebelastung eingestuft, sodass Anpassungsmaßnahmen zur Minderung der Lufttemperatur notwendig sind. Eine erste Auswertung von Luftbildern hat ergeben, dass 80% der Fläche zwischen den Gebäuden (~50 % der Gesamtfläche) versiegelt ist. Insbesondere für die Innenhöfe – diese machen bis zu 30 % der Fläche zwischen den Gebäuden aus (~20 % der Gesamtfläche) – besteht die Möglichkeit der Entsiegelung. Nachdem die Einstellungen für den Bebauungstyp »Blockbebauung«, die Bebauungsumgebung »Siedlung locker« und die Anpassungsmaßnahme »Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden« gewählt wurden, kann das Ergebnis abgelesen werden (siehe *Abb. 6-12-2*). Eine 30 %ige Entsiegelung könnte eine – auf das Stadtquartier bezogene – mittlere Temperaturreduktion von 0,5 K am Tag und 0,35 K in der Nacht bringen (Referenz 80 % wird um 30 % auf 50 % verringert, *Abb. 6-12-2*). Generell ist die Maßnahme geeignet um die Lufttemperatur am Tag und in der Nacht zu reduzieren.

Die zu erwartende Temperaturreduktion ist vielleicht nicht ausreichend, um die zukünftig erwartete Klimaerwärmung auszugleichen. Dann können entwe-

Tab. 6-12-1: *Überblick über die in INKAS enthaltenen Bebauungstypen, Bebauungsumgebungen sowie Anpassungsmaßnahmen und Stadtentwicklungsszenarios (Stand Sep 2019).*

Bebauungstyp	Bebauungsumgebung	Maßnahme
Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung	Freifläche	***Bebauungs- und Oberflächeneigenschaften***
Dorfkern und Einfamilienhaussiedlung	Dörfliches Umland	Albedo der Dachflächen
Reihenhaussiedlung	Siedlung locker	Albedo der Wandflächen
Zeilenbebauung	Ländliches Umland mit Wald	Albedo der versiegelten Flächen zwischen Gebäuden
Zeilenbebauung und Hochhäuser		Anteil der Dachbegrünung
Blockbebauung		Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden
Citybebauung		Mittlere Gebäudehöhe
Mittelalterliche Altstadt		Grundflächenanteil der Gebäude
Industrie- und Lagergebäude		***Grün- und Wasserflächen***
		Größe des Parks
		Größe der Wasserfläche (20°C Wassertemperatur)
		Größe der Wasserfläche (24°C Wassertemperatur)

INKAS - Wirkungsanalyse EN

Auswahl der Werkzeuge

Auswahl der Kategorie: Bebauungs- und Oberflächeneigenschaften

Auswahl der Parameter: Lufttemperatur

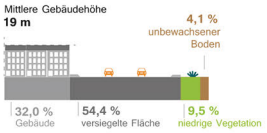
Anzahl der Experimente: Ein Experiment

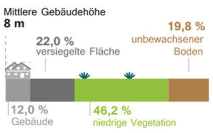
Stadtgröße: 25 km²

Bebauungstyp: Blockbebauung

Bebauungsumgebung: Siedlung locker

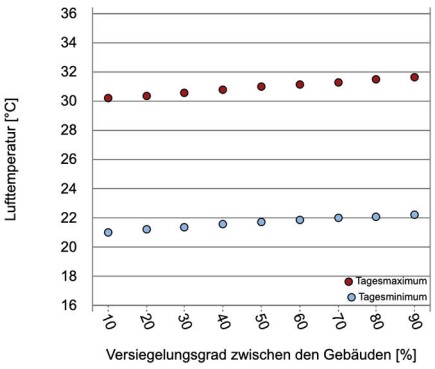
Anpassungsmaßnahme: Versiegelungsgrad zwischen den Geb

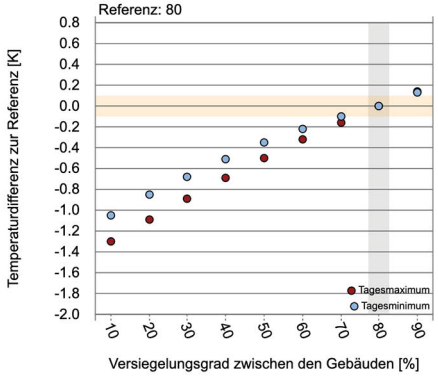






Ergebnis anzeigen



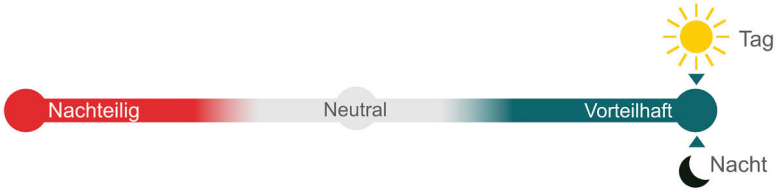


Beschreibung der Grafik

Die Punkt-Diagramme zeigen das Tagesmaximum und Tagesminimum der Lufttemperatur in dem gewählten Bebauungstyp (basierend auf den Modellergebnissen von 16 Uhr bzw. 7 Uhr MESZ des untersuchten Tages). Die linke Grafik zeigt die absoluten Lufttemperaturen. Die rechte Grafik zeigt die Differenzen zwischen der Lufttemperatur bei Anwendung einer Maßnahme und der Lufttemperatur bei der zugrunde liegenden Referenzbedingung (grau markiert). In der rechten Abbildung ist der Temperaturbereich zwischen -0,1 K und 0,1 K orange markiert. Temperaturdifferenzen und Tendenzen die in diesen Bereich fallen sind aufgrund von Modellunsicherheiten nicht signifikant.

Wirksamkeit der ausgewählten Anpassungsmaßnahme

Die Anpassungsmaßnahme „Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden reduzieren“ ist geeignet, in der ausgewählten Bebauung sowohl am Tag als auch in der Nacht die Lufttemperatur in der bodennahen Atmosphäre zu senken. Die räumliche Wirkung ist auf die unmittelbare bzw. nähere Umgebung begrenzt, kann aber bei großflächiger Umsetzung auch überörtlich zu einer Temperaturänderung im Stadtquartier führen.



PDF

der weitere Flächen zur Entsiegelung aktiviert werden oder es werden weitere Maßnahmen ergriffen. Bei einer weiteren Entsiegelung z. B. auf 30 % Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden würde die Lufttemperatur am Tag um 0,89 K und in der Nacht um 0,68 K gegenüber der Referenz sinken.

In INKAS kann die Wirkung zweier Anpassungsmaßnahmen wie Dachbegrünung oder der Einsatz reflektierender Materialien (Albedo) auch verglichen werden. Im nächsten Schritt gilt es abzuwägen – auch unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses – welche der Anpassungsmaßnahmen z. B. mit einem Förderprogramm für Eigentümer von der Kommune umgesetzt wird. Weitere Synergien der Maßnahmen sind hierbei ebenfalls zu berücksichtigen.

Schlussbetrachtung

Um Handlungsoptionen priorisieren zu können, benötigen Stadtplaner/-innen detaillierte Informationen zur Klimawirkung einer Maßnahme, zum Beispiel: Wie hoch ist der zu erwartende Effekt zur Minderung des sommerlichen Hitzestresses? Das DWD Informationsportal Klimaanpassung in Städten (INKAS) hilft bei der Planung effektiver Klimaanpassungsstrategien gegen städtische Überwärmung. Hierzu stehen in INKAS die beiden Werkzeuge INKAS-Wirkungsanalyse und INKAS-Flächenanalyse zu Verfügung. Mit Hilfe der INKAS-Flächenanalyse können Städte und Kommunen feststellen, welches Gefährdungspotential für sommerliche Hitzebelastung ein charakteristischer, städtischer Bebauungstyp hat. Mit Hilfe der INKAS-Wirkungsanalyse kann die zu erwartende Änderung der Lufttemperatur bei einer städtebaulichen Maßnahme eingeschätzt und mit anderen möglichen Maßnahmen verglichen werden. INKAS kann auch als Lerntool in der Verwaltung genutzt werden. Die Interaktion des Nutzers durch das Einstellen verschiedener Optionen und das Erkunden und Vergleichen der Ergebnisse fördert die Auseinandersetzung mit dem Thema Stadtklima und Hitze in der Stadt und das Verständnis zur Effektivität von Handlungsoptionen der Stadtentwicklung.

Literatur

BMBAU (1980): Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärme-versorgungssystemen. Schriftenreihe Raumordnung 06.044, Forschungsprojekt BMBau RS II 4-70 41 02-77. 10.

BUCHHOLZ S. & M. KOSSMANN (2015): Research note. Visualisation of summer heat intensity for different settlement types and varying surface fraction partitioning. Landscape and Urban Planning144, 59-64, doi:10.1016/j.landurbplan.2015.08.002.

GABRIEL K. & W. ENDLICHER (2011): Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. Environmental Pollution, 159 (8-9), 2044-2050.

HARTMANN D. L., A. M. G. KLEIN TANK, M. RUSTICUCCI, L. V. ALEXANDER et al. (2013) Observations: Atmosphere and Surface. In: Stocker T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (eds.)]. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

JOCHNER S. & A. MENZEL (2015): Urban phenological studies - Past, present, future. Environmental Pollution 203 (2015) 250-261.

KUTTLER W. (2004): Stadtklima Teil 1: Grundzüge und Ursachen. In: Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung – Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 16(3), 187-199.

LANUV (2013): Klimawandelgerechte Metropolregion Köln. ISSN 1864-3930, LANUV-Fachbericht 50.

LEE H. J. & H. MAYER (2018): Thermal comfort of pedestrians in an urban street canyon is affected by increasing albedo of building walls. International Journal of Biometeorology, 62 (7), DOI:10.1007/s00484-018-1523-5.

OKE T. R., G. MILLS, A. CHRISTEN & J. A. VOOGT (2017): Urban Climates. Cambridge University Press, ISBN 9781139016476. 546 pages.

SANTAMOURIS M., N. PAPANIKOLAOU, I. LIVADA, I. KORONAKIS, C. GEORGAKIS, A. ARGIRIOU & D. N. ASSIMAKOPOULOS (2001): On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. Sol. Energy 70(3), 201-216.

STAIGER H., G. LASCHEWSKI & A. GRÄTZ (2012): The perceived temperature – a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. Int. J. Biometeorol. No 56, 165-176.

UBA (2019): Umfrage Wirkung der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) für die Kommunen. Climate Change 01/2019, ISSN 1862-4359.

UBA (2016): Klimalotse. *https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/klimalotse#Einf%C3%BChrung.*

Kontakt:
Dr. Saskia Buchholz
Deutscher Wetterdienst (DWD - Offenbach)
Saskia.Buchholz@dwd.de

Buchholz S. (2019): INKAS - ein vielseitiges Klimaberatungswerkzeug für die Stadtentwicklung. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 269-274. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.39.

6.12 Entwicklung geeigneter Stadtstrukturen in verschiedenen Klimazonen

Sebastian Kupski & Lutz Katzschner

Bauweisen und Stadtstrukturen beeinflussen wesentlich das Mikroklima einer Stadt. Um dies zu analysieren, ist es wichtig eine Klassifizierung der Stadtstrukturen vorzunehmen und sie klimatisch zu beschreiben. Auch zeigt sich, dass es notwendig ist, Strukturen weltweit miteinander vergleichen zu können. Gebäudeformen haben sich häufig an die klimatischen Gegebenheiten angepasst und sollten bei Stadtplanungen beachtet werden. Da verschiede Klassifikationsmuster verwandt werden, wird hier eine Zusammenstellung der Verfahren vorgestellt.

Urban Structure Types in different Climate Zones: *Construction methods and urban structures significantly influence the microclimate of a city. To analyze this, it is important to make a classification of the city structures and to describe them climatically. It also shows that it is necessary to be able to compare structures worldwide. Building forms have often adapted to the climatic conditions and should be considered in urban planning warden. Since different classification patterns are used a compilation of procedures is here presented.*

Problemstellung

Bauweisen sind schon in verschiedensten Formen dem Klima angepasst worden. In Zeiten des Klimawandels verstärken sich stadtklimatische Auswirkungen und erfordern eine noch bedeutsamere Ausrichtung darauf. Dazu kommen die stadtklimatisch, nachbarschaftlichen Auswirkungen. Die städtische Wärmeinsel als Lufttemperaturunterschied zwischen der Stadt und seinem Umland bildet sich nicht linear aus, sondern ist abhängig von der Bebauungsdichte und der Freiraumbeschaffenheit.

Zahlreiche Stadtklimaanalysen weltweit (Ng 2015) verwenden bei ihren Untersuchungen Klimaeinteilungen, die sich auf die Landnutzung und Stadtstruktur stützen und dort spezifische Klimaeigenschaften darstellen.

Für Stadtklimaanalysen wurden Methoden entwickelt, die die klimatischen Charakteristika in Kartenform darstellen. Im Verein Deutscher Ingenieure (VDI 2015) wurden die Klimatope beschrieben. In dieser VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 sind Klimatope aufgeführt und in ihren Eigenschaften dargestellt. Eine Legende ist in *Abb. 6.12-2* angegeben. Weiterhin wurden nach Stewart & Oke (2012) *Local Climate Zones* (LCZ) entwickelt. Stadtstrukturtypen (UST) können auch auf Basis der Gebäudedaten und Oberflächenbeschaffenheiten eingeteilt warden (Peretti 2014). Diese Typisierungen wurden jedoch im Wesentlichen aus den moderaten Klimaten heraus abgeleitet und die dort befindlichen Strukturen aufgenommen. Eine Erweiterung

Konstruktionsprinzipien für die vier grundlegenden Klimatypen

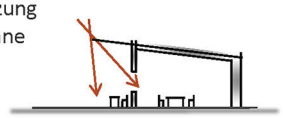
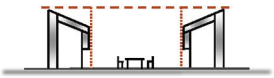
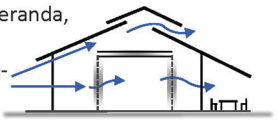
Klimatyp	Schutz gegen	Notwendige Kontrolle	Typische Charakteristik
Kalt	Wind, Kälte, Schneeverwehung und Schneelast	Minimaler Wärmeverlust, Windschutz	z.B. Iglu, wenige Öffnungen, Windschutz Isolation 
Moderat	Regen, Schnee, Kalte Winde, Winterkälte, Sommerhitze	Minimaler Wärmeverlust (Winter), Sonneneinstrahlung (Sommer), Verschattung, Belüftung	Isolation, Nutzung der Wintersonne durch Fenster, Verschattung (Sommer) 
Heiß und trocken	Sonneneinstrahlung, Sand, Staub, Trockenheit	Regennutzung, große Amplitude der Lufttemperatur	Verschattete Veranda zum Innenhof, Wände mit Speicherkapazität 
Heiß und feucht	Regen, Hitze, Feuchtigkeit, Sonneneinstrahlung	Belüftung, Kühlung, Verschattung	Verschattete Veranda, Querlüftung, Belüftete Dachkonstruktion 

Abb. 6.12-1: *Haustypen verschiedener Klimatate.*

auf tropische und informelle Planungen muss noch vorgenommen werden.

Um dies ausreichend zu erfassen, werden Stadtklimaanalysen als geeignetes Mittel zur Bewertung möglicher Klimaauswirkungen angesehen. Ihre Ergebnisse werden in sogenannten Klimafunktionskarten zusammengefasst und bundesweit kartiert. Überhitzungsgebiete und Gebiete mit Lüftungsdefiziten, wie dicht besiedelte Innenstädte oder Gewerbe-/Industriegebiete mit großen Parkplätzen und geringer Vegetation, werden kartiert und ebenso günstig und potentiell Gebiete – Wiesen, Wälder oder andere naturnahe Gebiete – mit einer positiven Auswirkung auf das Stadtklima und mildernde Wirkung auf verschmutzte Gebiete.

Eine kommunale Klimaanpassungsstrategie arbeitet in diesem Zusammenhang mit dem Schutz der klimaschonenden Potenziale und mit der Sanierung von möglichen Defizitgebieten. Dies bedeutet, geeignete dem Stadtklima entsprechende Stadtstrukturen zu entwickeln. Auszurichten ist dies an den thermischen und lufthygienischen Bedingungen.

Stadtstrukturen und Stadtklima

Die Entwicklung urbaner Stadtstrukturen kann auf Basis der vorhandenen Landnutzungsdaten abgeleitet werden. Eine Gegenüberstellung ist in *Abb. 6.12-2* dargestellt. Die oben beschriebenen Analysemethoden sind jedoch nicht einheitlich. Vor allem bei Berechnungen der Grünflächenanteile, Gebäudevolumen oder Offenheiten über den Ratio Aspect sind Stadtstrukturanalysen, die auf genauen Gebäudeumriss- und Gebäudehöhendaten beruhen, zu bevorzugen. Dieses Kriterium erfüllt die Analyse nach den Stadtstrukturtypen (UST), die auf Basis der Anteile an Gebäude-, Frei-, und Straßenfläche entwickelt werden. Ein Vergleich zu den *Local Climate Zones (LCZ)* nach Stewart & Oke (2012) ist in *Abb. 6.12-2* zu ersehen.

Die UST bilden eine detaillierte und spezifische Beschreibung der Stadt und können daher nicht komplett zu den bestehende LCZ bzw. deren Kombination zugeordnet werden. Kompakt hohe Bebauungsformen finden wir beispielsweise in Lateinamerika und Asien nicht, jedoch in vielen europäischen Städten. Mittelalterliche Stadtkerne oder die informellen Bebauungstrukturen Lateinamerikas sind in der Klassifikation der LCZ nicht aufgeführt, sie finden sich auch nicht in Europa.

In *Abb. 6.12-3* sind typische Stadtstrukturen von Belo Horizonte in Brasilien dargestellt, wie sie sich nach der Definition der LCZ (Stewart & Oke 2012)

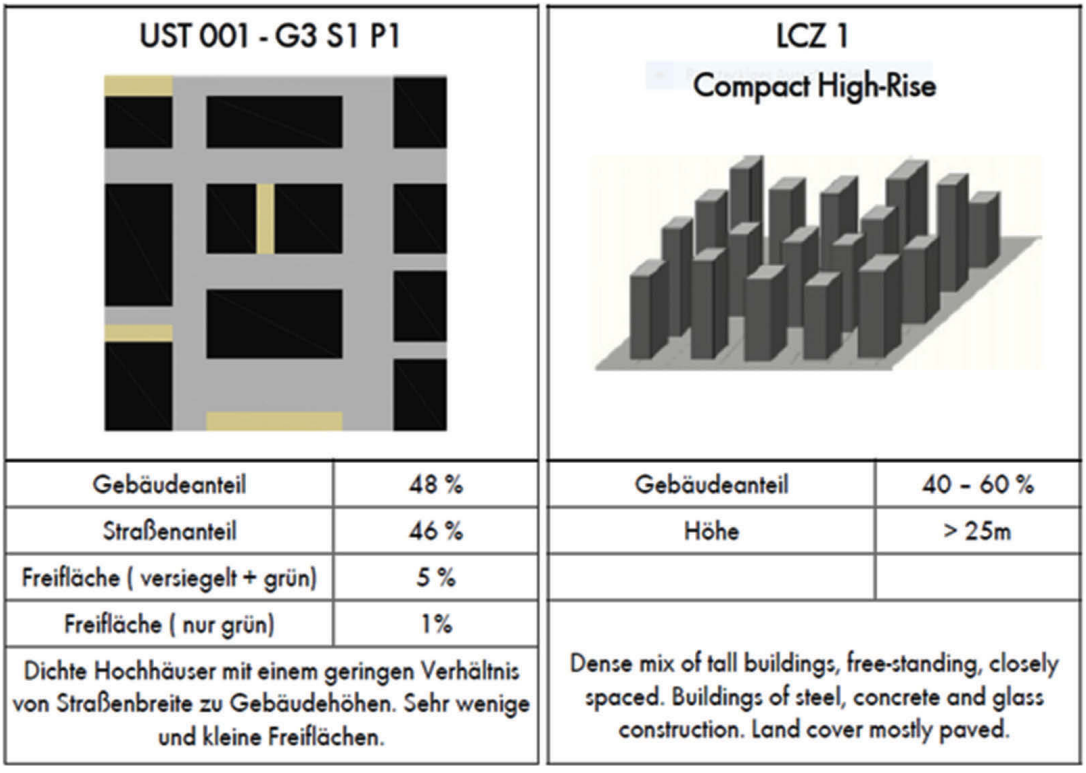


Abb. 6.12-2: *Beschreibung der Urban Structure Types und der Local Climate Zones (Peretti 2014).*

ergeben. Die Klimakarte der Klimatope zeigt jedoch, dass auch in den informellen Baugebieten, hier in den Favelas, die dichte Bebauung und fehlende Vegetation zu höheren Belastungen führt. Schattenbildung ist nur durch die kleineren Gebäude vorhanden, so dass es auch im Straßenraum und in den Innenhofbereichen zu extremen Wärmebelastungen kommt. Im Zuge des Klimawandels und der Erhöhung der urbanen Wärmeinsel sind hier Maßnahmen zur Reduzierung der Einstrahlung am Tage und einer ausreichenden Belüftung in den Nachtstunden wichtig.

Für neuere Stadtentwicklungen sind diese Erkenntnisse von großer Bedeutung. Zum einen zeigen die Analysen, wie sich die urbane Wärmeinsel in den Klimatopen wiederspiegelt und welche Maßnahmen – wie Beschattung oder Ventilation – angewandt werden können.

In *Abb. 6.12-4* sind Beispiele verschiedener Strukturen bebildert. *Abb. 6.12-4a* zeigt ein charakteristisches Gebäude im feucht tropischen Klima mit ausreichender Belüftung und kleinklimatischen Übergangsbereichen zwischen Außen und Innen. Hier wird die Wohnraumnutzung dem Klima angepasst mit beispielsweise den Schlafräumen im oberen Bereich bei guter Belüftung. Im Gegensatz dazu sind die Häuser eines Neubaugebiets in der Hamburger Hafencity mit ihren Glasfassaden ausgestattet *Abb. 6.12-4b*, die keine ausreichende Möglichkeit einer Nutzung der natürlichen Ventilation lassen. Im rechten Bild (*Abb. 6.12-4c)* ist die verdichtete und nachverdichtete Stadt Ho Chi Minh zu sehen. Fehlende Vegetation bei gleichzeitig mangelnder Belüftung führt dort zu extremen thermischen Belastungen.

Das Beispiel: Frankfurt

Die Realisierung einer neuen Entwicklung in Frankfurt soll hier aufgezeigt werden. Das Ziel war es, eine neue innerstädtische Siedlung klimasensibel zu gestalten und sicherzustellen, dass sich die klimatischen Bedingungen in anderen Stadtteilen, die durch höhere Wärmebelastungsprobleme gekennzeichnet sind, nicht verschlechtern.

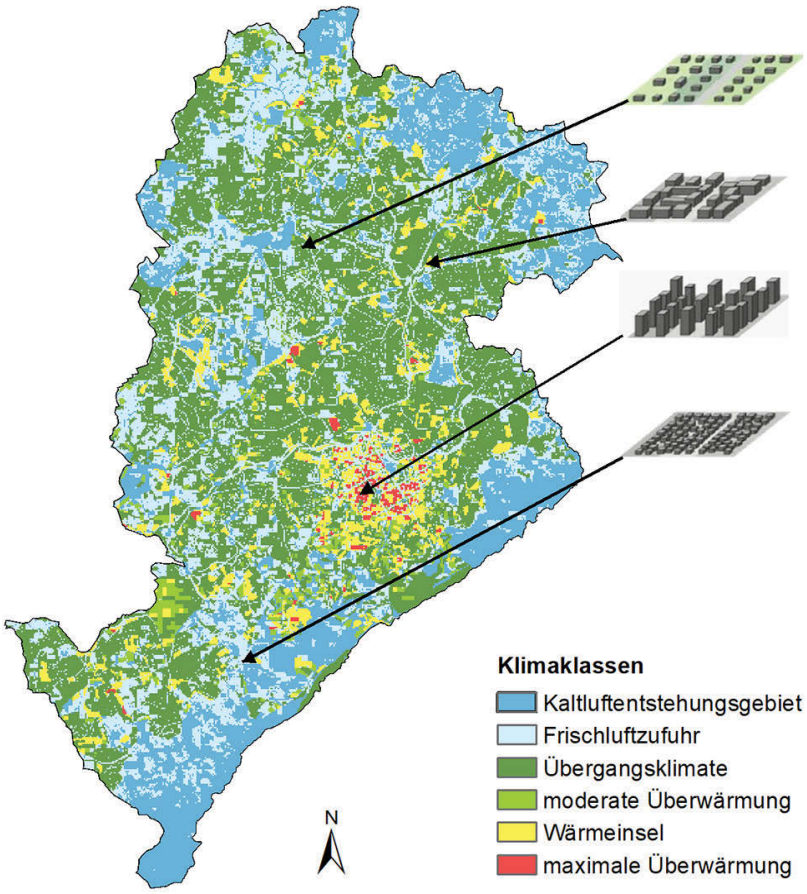


Abb. 6.12-3: *Stadtstrukturen und Stadtklimatope (Klassifizierungen) in Belo Horizonte /Brasilien (Queiroz 2018)*



Abb. 6.12-4: *Gebäude im tropischen Klima von Joao Pessoa /Brasilien (oben) und Neubauten der Hafencity Hamburg (mitte) und Ho Chi Minh City (unten).*

Nach der Identifizierung der Funktionen und Wechselwirkungen des Stadtklimas wurde eine Kaltluftbewertung durchgeführt, um detailliertere Informationen über die fragmentierte und empfindliche Kaltluftsituation zu erhalten. Das Simulationsmodell KLAM_21 wurde zur Berechnung von Kaltluftströmungen in einem orographisch strukturierten Gelände angewendet. Dies wird in der Stadt- und Regionalplanung sowie bei der Standortwahl verwendet. Es wurden quantitative Aussagen zur Kaltlufthöhe und zum Volumenstrom in zwei Metern Höhe in hoher räumlicher Auflösung gemacht (*Abb. 6.12-5*). Gleichzeitig wurden detaillierte Klimamessungen und ein Kaltluftnachweis an zwei verschiedenen Stellen durchgeführt, um das lokale Bild recht gut beschreiben zu können.

Im Folgenden wurden die architektonischen Entwürfe mit dem dreidimensionalen Mikroklima-Modell ENVI-met (Pro-Version) berechnet. Die Nachbarschaft direkt neben dem neuen Entwicklungsgebiet war Teil der Simulation. Dazu wurden die Parameter thermischer Komfort und Belüftung dargestellt und die Entwürfe einer Prüfung unterzogen. Das Hauptaugenmerk lag auf der Förderung von Zirkulationen bei austauscharmen Wetterlagen und einer ausreichenden Versorgung mit Schatten für die Reduktion des Stahlungseintrags. Die Ergebnisse sind in *Abb. 6.12-6* dargestellt. Aus ihr ist auch zu ersehen, an welchen Stellen Probleme der Wärmebelastung auftreten.

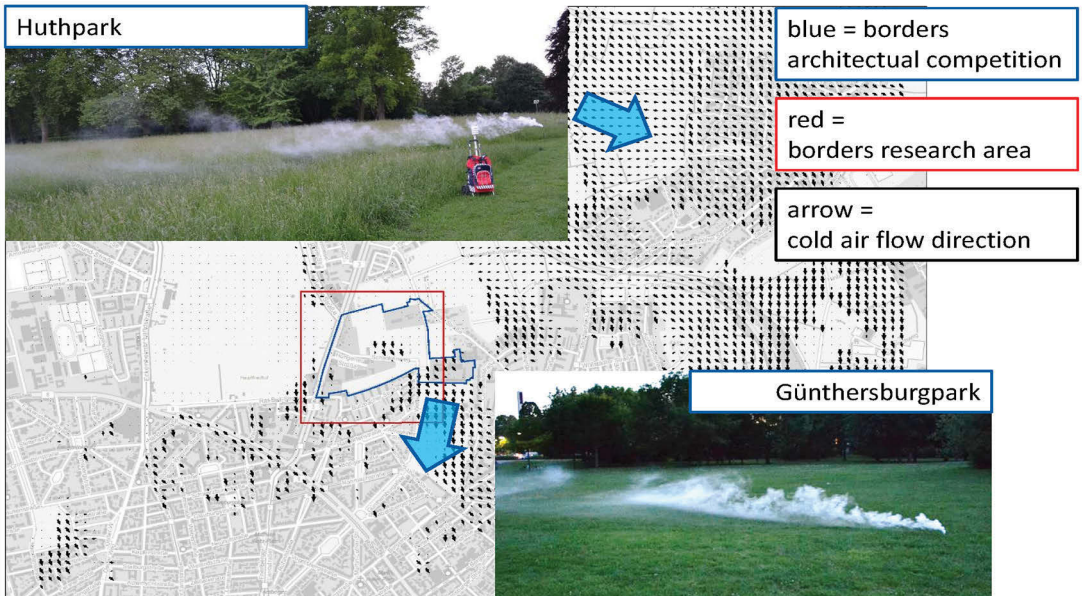


Abb. 6.12-5: *Kaltluftsimulation und Prüfgasströmung im Untersuchungsgebiet .*

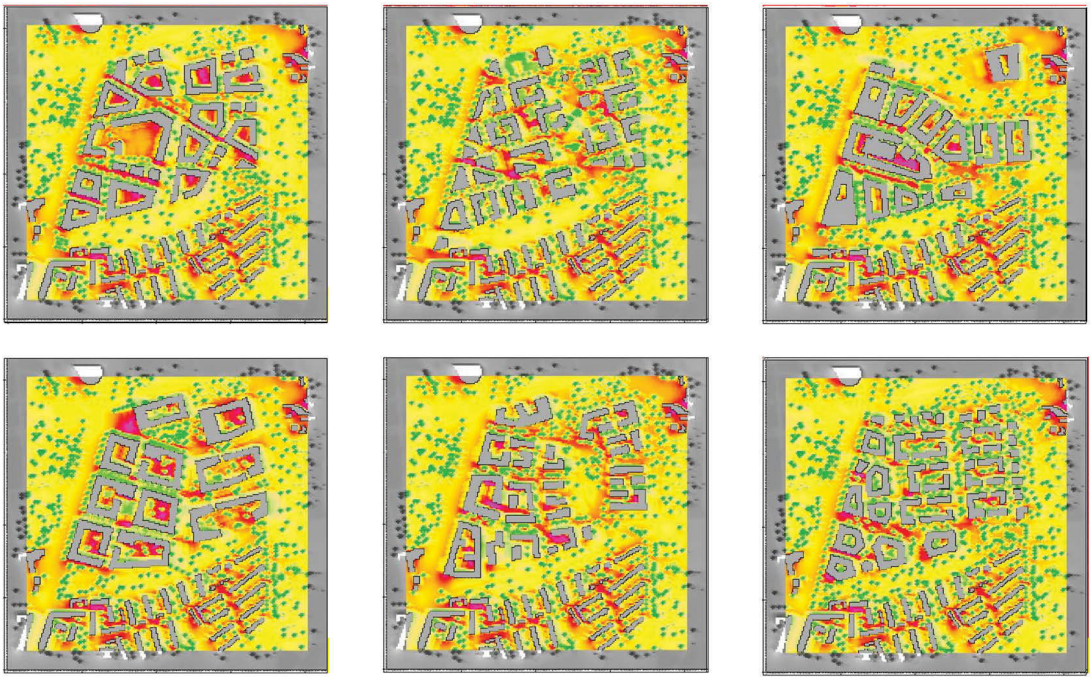


Abb. 6.12-6: Räumliche Verteilung der thermischen Belastungswerte (PET) jedes Entwurfes

Schlußfolgerungen

Wenn Städte weltweit auf den Klimawandel und seine Auswirkungen – wie Anstieg der Lufttemperatur, Zunahme von Starkniederschlägen und Anstieg des Meeresspiegels – gut vorbereitet und widerstandsfähig sein wollen, benötigen sie Informationen in Form der aktuellen Analysedaten, ihre individuelle Risikostufe heute zu berechnen. Danach muss jede Planungs- oder Landnutzungsänderung überprüft werden, um den lokalen Effekt zu zeigen, damit eine Anpassungsstrategie an die zukünftigen Anforderungen entwickelt werden kann. Bei der Planung müssen städtische Klimaprobleme berücksichtigt werden. Eine Verbesserung kann nur funktionieren, wenn die Planung auf intelligenter Plattform basiert.

Das Verfahren zeigt eine effektive Vorgehensweise bei einem Verdichtungsprozess. Im Vorfeld werden Informationen zum Stadtklima benötigt, gefolgt vom Architekturentwurf, der wiederum mit der Modellierung des Mikroklimas verglichen wird. Auf diese Weise kann eine Nachverdichtung in Städten organisiert werden, die den höchstmöglichen thermischen Komfort bietet. Es entspricht auch den aktuellen deutschen Richtlinien (VDI 3787 Blatt 1 und 3787 Blatt 8: Stadtplanung und Klimawandel).

Literatur

STEWART D. & T. R. OKE (2012): Local climate zones for urban temperature studies. American Meteorological Society. DOI:10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

NG E. & C. REN (2015): The urban climatic map: a methodology for sustainable urban planning. London, New York: Routledge.

STADTBAUPLAN Gmbh Darmstadt (2017) Auslobung eines Architektur Wettbewerbs, Innovationsquartier.

STADT FRANKFURT am MAIN (2016) Klimaplanatlas Frankfurt am Main.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2015): VDI-Richtloinie 3787, Blatt 1: Umweltmeteorologie - Klima und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, Berlin: VDI, Beuth Verlag.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2019): VDI-Richtlinie 3787, Blatt 8: Städtebau im Klimawandel (Gründruck).

PERETTI G. (2014): Erarbeitung der globalen UST, report 4c; green4cites Sobek Architekten, Stuttgart.

QUEIROZ S., D. FERREIRA, L. WELLINGTON, L. KATZSCHNER & E. SA DE ASSIS (2018): Methodology to Describe thermal Comfort from Urban Structure Types, ICUC 2018.

Kontakt:
Sebastian Kupski
Prof. Dr. Lutz Katzschner
Universität Kassel - Institut Urbane Entwicklungen
katzschn@uni-kassel.de

Kupski S. & L. Katzschner (2019): Entwicklung geeigneter Stadtstrukturen in verschiedener Klimazonen. In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 275-279. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.40.

6.13 Stadtstruktur und Klimawandel: Wiarum sind urbane Transformationen so schwierig zu gestalten?

Jürgen P. Kropp

Städte spielen zur Bewältigung der Klimakrise eine entscheidende Rolle, denn sie sind die bei weitem größten Emittenten von Treibhausgasen. Klimaschutz in Städten ist jedoch nicht einfach zu implementieren, denn oft treten Zielkonflikte auf, welche nicht so leicht lösbar sind. Analysen beleuchten, wie z.B. Emissionen und Hitzeinseln mit Dichte, Größe und Struktur einer Stadt korrelieren. Integierte Lösungen für eine nachhaltige und in die Zukunft gerichtete Urbanität brauchen deshalb neben Simulationsstudien und der innovativen Implementation einer konsequent drei-dimensionalen Stadtplanung, auch einen visionären Diskurs über urbanes Leben der Zukunft.

Urban Structure and Climate Change: Why it is so difficult to implement urban transformations action?
Urban Area are an important factor for the solution of the climate crisis, as they are by far the largest emitters of greenhouse gases. Climate protection in cities, however, is a difficult task as often target conflicts arise which are not easy to solve. Recent analyses show how, for example, spatial greenhouse gas emissions and urban heat islands correlate with urban density, size and structure of cities. Integrated solutions for future sustainable cities therefore need, besides multi-criteria simulation studies and an innovative and consequent implementation of a three-dimensional urban planning also a discourse about our visions for future urban life.

Städte belegen weltweit nur 2-3% der insgesamt verfügbaren Landfläche, sind jedoch in den letzen 150 Jahren zu einem relevanten Faktor in Bezug auf Klimaschutz und Klimanpassung geworden. Zur Zeit leben ca. 54% der Weltbevölkerung in urbanen Zentren – mit weiter steigender Tendenz. Die Vereinten Nationen prognostizieren, dass um 2050 ca. 68% der globalen Bevölkerung in Städten leben werden. Dies hat weitreichende Konsequenzen, denn für diese Neubürger müssen adäquate Infrastrukturen bereit gestellt werden. Blickt man in die Historie der urbanen Entwicklung, so erscheint dies durchaus möglich, denn in der Vergangenheit haben sich Städte immer als Zentrum kreativer Vielfalt und innovativer Kraft erwiesen. Allerdings weiss man heute auch, dass Städte für ca. 70% der energiebezogenen, globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich sind (IEA 2008). Gleichzeitig konzentrieren sich viele Anlage- und Wirtschaftgüter sowie hochwertige Infrastruktur in Städten. Viele Städte liegen zudem in Regionen, z.B. in ariden Gebieten oder an Küsten, welche potenziell verwundbar gegenüber den Folgen des Klimawandels sind. Dies impliziert, dass Städte sowohl Opfer von Klimawirkungen werden und Schäden aufgrund der Güterkonzentration überproportional ausfallen können, dass aber die Klimaproblematik selbst auch in Städten gelöst werden muss.

Traditionell sind Stadtplaner und Bürgermeister allerdings mehr daran interessiert ihre Städte resilient, d.h. Städte entsprechend an die Folgen des Klimawandels angepasst weiterzuentwickeln. Die Forderung einer Klimawandelanpassung ist verständlich, denn sie gehört zur Daseinsvorsorge, welche allen Einwohnern ein möglichst an Naturrisiken armes Leben sichern soll. Nach der Verabschiedung des Pariser Klimaschutzabkommens im Jahr 2015 sind allerdings auch zunehmend Anstrengungen zur Minderung von Treibhausgasen als Politikziel in Städten zu verzeichnen.

Trotzdem stehen Planer häufig vor einer Reihe von Problemen. Zunächst ist vielfach unklar, wie bestehende Infrastruktur in Bezug auf Emissionen einzuordnen ist. Also die Beantwortung der Frage, ob im Vergleich eine bestimmte Stadt gut oder schlecht da steht. Des weiteren ist oft unklar, wie Zielkonflikte angegangen und aufgelöst werden können. Also ob zunächst in die Minderung von Treibhausgasen oder in die Klimaanpassung und gegebenenfalls in welchem Sektor zuerst investiert werden soll. Schließlich gehen alle Aktivitäten im Feld der urbanen Transformation auch mit langfristigen Veränderungen in Bezug auf die vorhandenen Infrastrukturen einher, welche sich nicht beliebig umkehren lassen. Dies definiert oft einen Beratungsbedarf, welchen Stadtverantwortliche oft nicht befriedigt bekommen. Intensivierte konzertierte Aktivitäten von Wissenschaft, Planung und Nichtregierungsorganisationen sind also wünschenswert. Da jedoch oft ein eindimensionaler Blick auf eine Problemlage nicht ausreichend ist, soll im Folgenden anhand von Stadtstrukturuntersuchungen erläutert werden.

Hitzebelastung in Städten

Die Hitzebelastung in Städten ist bereit seit mehreren Jahrzehnten ein Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung und im Grundsatz ausführlich beschrieben und verstanden (z.B. Oke 1982, Taha 1997). Für die thermische Belastung eines urbanen Zentrums lassen sich mehrere Faktoren identifizieren, welche bereits in Kap. 4.1 Kemen & Kistemann und 4.7 Graw et al. - in diesem Band ausführlich diskutiert werden.

Um die Ursachen von urbanen Hitzeinseln abzumildern, ist es erforderlich, urbane Struktur, Materialverwendung und Dichte detaillierter zu untersuchen. Warum ist dies so wichtig? Seit langem ist bekannt, das Hitzebelastung in Städten ernste Gesundheitsfolgen verursachen kann. Insbesondere die Alterskohorte 65+

gilt als besonders gefährdet (s. Kap. 4.1 Kemen & Kistemann - in diesem Band). Grund für die Anfälligkeit ist, dass durch die Produktion von Verdunstungskälte mittels Schwitzen die thermische Regulation des menschlichen Organismusses erfolgt. Ist die Temperaturregulation gefährdet, kann es zur Hitzeerschöpfung oder sogar zum Hitzschlag kommen. Untersuchungen zeigen, dass bereits heute die Zahl der Hitzetage in urbanen Zentren ca. doppelt so hoch sind, wie im ruralen Umland. Würde sich der Klimawandel ungebremst fortsetzen, so könnte die Zahl der Hitzetage noch um den Faktor 10 ansteigen. Dies bedeutet, dass hinsichtlich der zukünftigen Hitzebelastung und der Gesundheitsvorsorge zukünftig ein erheblicher Handlungsbedarf bestehen könnte (*Abb. 6.13-1*).

Urbane Struktur und Hitzeinseln

Detailuntersuchungen haben gezeigt, dass sich die Ausprägung von Hitzeinseln stark von Stadt zu Stadt unterscheiden kann. Da es das Ziel dieses Aufsatzes ist, Möglichkeiten zur Minderung von Hitzeeffekten zu diskutieren, wird im weiteren die Oberflächentemperatur (*Land-Surface-Temperatur*, LST) zur Analyse herangezogen, denn diese ist eine direkte Observable für die einfallende Strahlungsenergie, während die Lufttemperatur in 2m Höhe noch weiteren Faktoren, wie z.B. einer Durchmischung, oder konvektiven Einflüssen unterliegt (siehe z.B. Zhou et al. 2016). Um eine systematische Untersuchung des urbanen Hitzeinseleffektes zu ermöglichen, wurde ein Ansatz von Rozenfeld et al. (2011) verwendet (CCA), welcher es ermöglicht, eine Stadtstruktur nicht als administrative Einheit, sondern als Stadt-Hinterland System aufzufassen. Dieser Ansatz ist kohärant mit der Definition des urbanen Hitzeinseleffektes, welcher eine Temperaturerhöhung, ΔT, im Zentrum im Vergleich zur Differenz der Durchschnittstemperaturen von Zentrum T'C und Hinterland T'B definiert. Das heisst ΔT = T'C - T'B. Zur Identifikation einer urbanen Struktur wurden CORINE Landnutzungsdaten (Büttner et al. 2007) mit 250m Auflösung verwendet. Artifizielle Flächen wurden dann mittels dem CCA geclustert und mit Oberflächentemperaturen auf der Basis von MODIS (*Moderate Resolution Imaging* Spectroradiometer der NASA Aqua Plattform

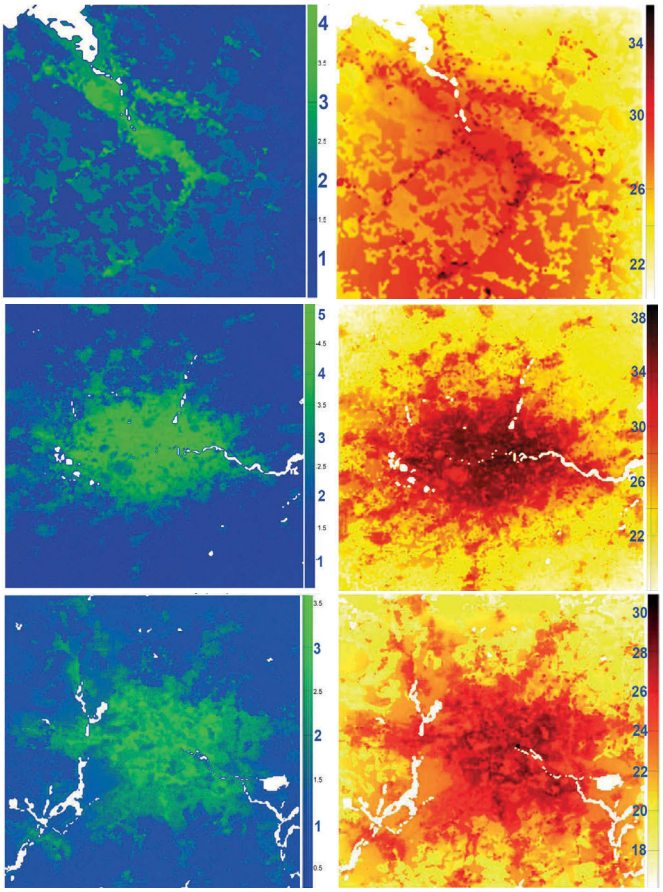


Abb. 6.13-1: *Hitzetage in europäischen Städten im Vergleich zum Umland: obere Reihe: Bilbao/Spanien, mittlere Reihe London/UK, untere Reihe: Berlin/Deutschland (RAMSES/VITO 2018). Die linke Seite zeigt die Situation für den Zeitraum 1986-2005, die rechte Seite die Bedingungen unter fortschreitendem Klimawandel (RCP8.5) für den Zeitraum 2081-2100. Zahlen geben die Hitzetage an.*

kombiniert. Auf diese Weise können die Oberflächentemperaturen für flächengleiche Areale einer Stadt sowie des Umlands verglichen werden (Zhou et al. 2013). Die Untersuchung von mehr als 100.000 Siedlungsstrukturen in Europa zeigt, dass sich die Typologie urbaner Hitzeinseln unterscheidet (*Abb. 6.13-2c*), wobei als Charakteristik die annuelle Variabilität der urbanen Temperatur im Verhältnis zum Umland definiert wird (Zhou et al. 2013).

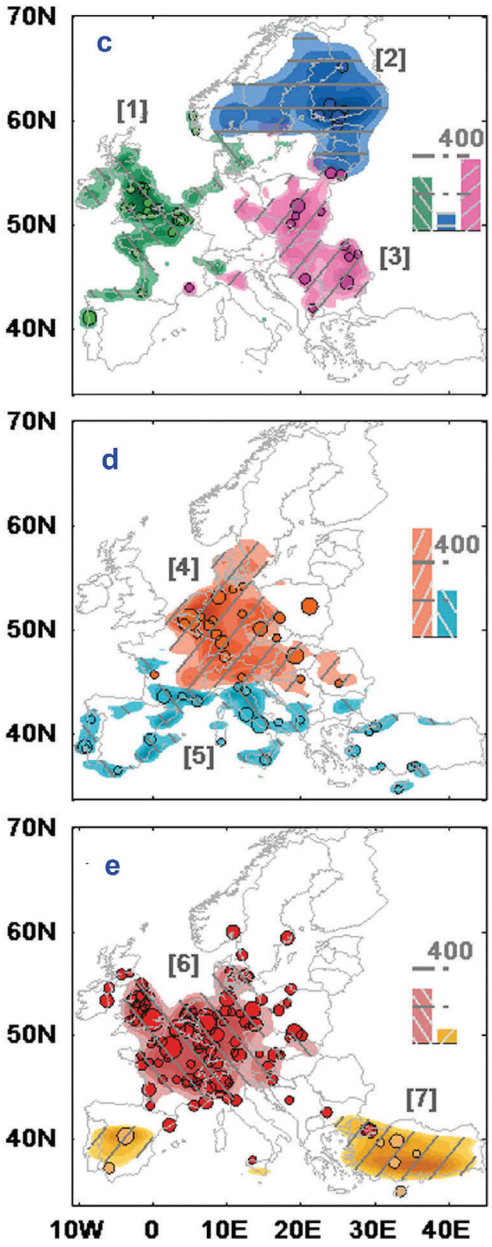
Insgesamt konnten durch den o.a. Algorithmus 7 Typen urbaner Hitzeinseln unterschieden werden. Zwei Cluster befinden sich z.B. in Mitteleuropa und einer in Nordeuropa. In der Mediterranen Region existiert ein Cluster für das Hinterland sowie ein weiterer für die Küstenregionen. Da sich die Typologien teilweise überlappen, kann das lokale Klima nicht allein für die Temperaturdifferenz und den annuellen Jahresgang als erklärende Variable ausreichend sein. Dies wird bereits beim Vergleich zweier Städte, nämlich Paris und Madrid, deutlich (*Abb. 6.13.2a-b*). Während für Paris im Jahresgang der Hitzeinseleffekt deutlich zu Tage tritt, ist dies in Madrid nicht der

Fall. Lediglich im Frühjahr ist eine leichte Erhöhung zu beobachten, während im Rest des Jahres sogar eine Absenkung der monatlichen Mitteltemperatur gegenüber dem Umland deutlich wird. Ein solcher Effekt tritt häufig auf, wenn eine feuchte Oberfläche durch ein arides oder semiarides Klima umgegeben ist. Warme trockene Luft aus dem Umland strömt in das urbane Zentrum und führt zur Verdunstung, was wiederum durch Verdunstungskälte zu einer Absenkung der Temperatur im Vergleich zum Umland führt. In Madrid macht man sich seit langem diesen Effekt zu Nutze, indem man die künstliche Bewässerung von Parks und Reinigung von Strassen mit gereignigtem Brauchwasser eingeführt hat, so dass hier der Oaseneffekt zur Geltung kommt.

Die Überlappung von Hitzeinseltypologien kann im weiteren auch noch durch generische Stadtstrukturen erklärt werden. Hieraus lassen sich auch Hinweise für eine zukünftige Stadtplanung ableiten, welche den Hitzinseleffekt abmildern kann. Zhou et al. (2017) haben gezeigt, dass kleinere aufgelockerte, oder auch verteilte Zentren mit vielen Grünflächen im Vorteil gegenüber kompakten urbanen Agglomerationen sind und einen deutlich geringeren Hitzeinseleffekt aufweisen. Des weiteren sind gestreckte Strukturen im Vorteil gegenüber runden dicht bebauten Zentren. Um das Maß eines Hitzeinseleffektes zu bestimmen, ist die Stadtgröße der dominierende Faktor, an zweiter Stelle steht die Dichte bzw. Kompaktheit einer Struktur und an der dritten Stelle die Anisometrie der Agglomeration (Zhou et al. 2017).

Urbane Struktur und Emissionen

Während sich für den Umgang mit Hitzebelastung Hinweise aus der wissenschaftlichen Forschung für eine zukünftige Stadtplanung ableiten lassen, sind im Gegensatz dazu Strukturformen und die Untersuchung wie sich diese mit Emissionen in Zusammenhang bringen lassen, bisher nur wenig präsent. Gudipudi et al. (2016) konnten für nordamerikanische Städte zeigen, dass dicht bebaute Städte grundsätzlich weniger Treibhausgasemissionen freisetzen. Da es sich hierbei um ein Skalenphänomen handelt, kann eine Verdopplung der Bevölkerungsdichte theoretisch zu mehr als 40% Emissionsreduktion führen, was jedoch nur ein theoretischer Wert ist. Die Untersuchungen zeigen, dass u.a. transportbezogene Emissionen deutlich mit der Bevölkerungsdichte korrelieren.



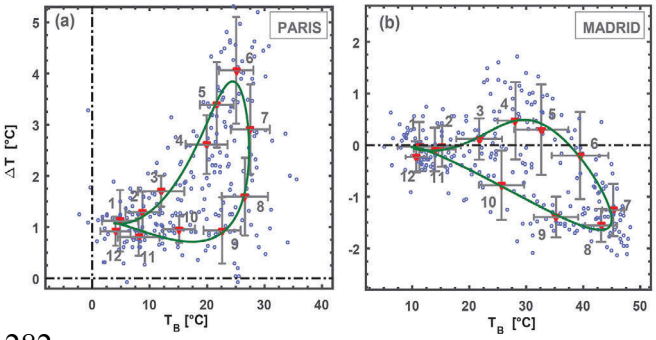


Abb. 6.13-2: **a-b:** *Unterscheidung des Hitzeinseleffektes von Paris (Cluster 6) und Madrid (Cluster 7) (rote Dreiecke: Mittelwert, graue Balken Varianz, grüne Kurve: gefitteter Jahresgang, Zahlen 1-12: Monate).* **c-e:** *Hitzeinseltypologien in Europa und in der MENA Region (nach Zhou et al. 2013). Cluster 6 (Paris) repräsentiert ein gemäßigtes Klima und viele große Städte; für Cluster 7 (Madrid) ist ein kontinentales semi-arides Klima vorherrschend.*

Grund hierfür ist, dass das Phänomen der jahrzehntelangen Suburbanisierung (*urban sprawling*), d.h. die Seggregation von Wohnen und Arbeit und damit die zunehmende Flächeninanspruchnahme ausserhalb der Zentren und die damit verbundene Induzierung von zusätzlichem Verkehr, sich eindeutig in der Treibhausgasbilanz einer Stadt niederschlägt. Hornweg et al. (2011) erläutert, dass in einer Agglomeration, in diesem Fall Toronto/Kanada, die pro Kopf Emissionen durchaus um den Faktor 10 variieren können, je nachdem, ob man das Zentrum (1.3 t CO_2äq/Jahr) oder suburbane Regionen betrachtet (13 t CO_2äq/Jahr). Naturgemäß ist aber der Verkehr nicht der einzige relevante Faktor für die urbane Treibhausgasbilanz. Auch Gebäude tragen erheblich zu Emissionen bei. UN Environment (2017) schätzt das der Gebäudesektor für ca. 28% der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Gudipudi et al. (2016) zeigte wiederum, dass auch diese Emissionen mit der Bevölkerungsdichte einer Stadt korrelieren, hierbei allerdings auch das lokale Klima als wichtiger Faktor berücksichtigt werden muss. Zudem ist der Einfluss der Bevölkerungsdichte geringer im Bezug auf die Emissionen des Gebäudesektors als im Vergleich zu denjenigen aus dem Transportbereich. Stellt man Dichte und absolute Bevölkerungszahl in den Zusammenhang, lässt sich generell zeigen, das Veränderungen der Bevölkerung einen größeren Einfluß auf die urbanen Emissionen haben, als Dichteveränderungen (Ribeiro et al. 2019).

Nimmt man solche Informationen kontextfrei auf, so läßt sich das vielerorts propagierte politische Ziel, Städte nachzuverdichten, um den Flächenverbrauch und Energieverbrauch und damit auch die Emissionen zu minimieren durchaus verstehen. Denn aus den Untersuchungen lässt sich klar ableiten, wie wichtig die urbane Form und Struktur für die Minderung von Treibhausgasemissionen ist (s. auch Creutzig et al. 2015). Dies gilt im Besonderen, wenn Infrastruktur erstmalig gebaut werden muss. *Tab. 6.13-1* erläutert unter Berücksichtigung der Zahlen für das urbane Bevölkerungswachstum, für wieviele Menschen global pro Dekade neue urbane Infrastuktur bereit gestellt werden musste, bzw. in Zukunft werden muss. Weil ein Großteil des urbanen Wachstums in Schwellen- und Entwicklungsländern stattfindet, ist es auch sinnvoll hier vermehrt in saubere Infrastruktur zu investieren. Besonders deutlich wird dies, wenn man das Skalenverhalten des Faktors Energie/Bruttoinlandsprodukt (BIP) sowie BIP/Bevölkerung für OECD Städte, mit dem von Städten in Entwicklungsländern vergleicht (»Urbane Kaya Identität«, Gudipudi et al. 2019). Ein Skalenexponent drückt die Proportionalität zwischen zwei Größen aus, also ob eine Größe im Verhältnis zu einer anderen z.B. überproportional wächst. Für OECD Städte ist der Skalenexponent für beide Faktoren nahe 1, was bedeutet, dass eine Verdoppelung der Bevölkerung oder des BIP auch zu einer Verdopplung des Energieverbrauches führt. Im Gegensatz dazu ist der Exponent für Städte in Entwicklungsländern für den Faktor BIP/Bevölkerung ca. 1,4, bzw. für Energie/BIP ca. 0,8, was bedeutet, dass eine Verdopplung der Bevölkerung nicht auch eine Verdopplung des Energieverbrauchs bedeutet, denn beide Faktoren sind über das BIP miteinander verküpft. Dies bedeutet, dass sich durch Investitionen in die urbane Infrastruktur/Technologie von Entwicklungs- und Schwellenländern ein überproportionaler Effekt in Bezug auf die Einsparung von Emissionen erzeugen lässt (*leap frogging*), während in OEDC Städten die Einsparung von Emissionen durch eine Verbesserung der Energieeffizienz zu Stande kommt, aber nicht durch die Reduktion der Energie selbst. Dies kann mit sogenannten Infrastruktur »*lock-ins*« (d.h. Infrastrukturänderungen erfolgen nur auf langen Zeitskalen) und einen allgemeinen Lebensstilwandel hin zu mehr Konsum interpretiert werden. Grundsätzlich lässt sich also festhalten, dass die Frage der fossilen Energienutzung in OECD Städten erhalten bleibt. Insbesondere sollte der individuelle Konsum als Ziel zukünftiger Klimaschutzpolitik mit in den Fokus gerückt werden.

Zielkonflikte in der Stadtplanung

Die Ergebnisse im vorherigen Abschnitt offenbaren mögliche Zielkonflikte, denn zur Minderung des Hitzeinseleffektes sollten Städte eher großzügig mit viel Stadtgrün angelegt werden. Auf der anderen Seite bieten Städte im Vergleich zu ruralen Umgebungen, durch ihre Dichte und gegebenenfalls kurze Wege, die Möglichkeit Ressourcen, insbesondere auch fossile, einzusparen. Der zunehmende Bevölkerungsdruck auf Städte sowie die unüberhörbare Nachfrage nach mehr und sauberem urbanem Freiraum spiegeln dies auch im »Reallabor« Stadt wieder. Daher muss es zukünftig darum gehen, Ziele der urbanen Planung transparent zu gestalten, in die unterschiedlichen Interessengruppen entsprechend hinein zu kommunizieren und daraus Szenarien zu entwickeln, welche eine Konsensentscheidung ermöglichen. Eine »*Top-Down*« Planung wie sie noch vor 10-20 Jahren möglich war, ist kein Mittel der Wahl mehr. Dies bedeutet auch, dass bei der Planung neuer oder beim Umbau alter Stadtquartiere unterschiedliche Skalen in Einklang zu bringen sind. Betrachtet man allein den Klimaschutz, ist es von Relevanz, die noch zur Verfügung stehende Zeit, bis zur erforderlich Karbonneutralität mit zu bedenken. Damit Stadtplaner ihre Aktivitäten vergleichbar gestalten und auch in einen globalen Zusammenhang einordnen können, sollte zukünftig eine Vergleichbarkeit von Emissionsprofilen

durch sogenannte *Accounting-Systeme* erfolgen. Soll es dagegen um die Verfügbarkeit von urbanem Grün und/oder um ein gesundes Stadtklima gehen, muss dies in Bezug auf die räumliche Skala diskutiert werden. Also beispielsweise wieviel Flächenverbrauch kann akzeptiert werden, oder muss es gegebenenfalls zur Umwidmung von Räumen kommen. Beispielsweise ist es denkbar, sich vom Individualverkehr zu entkoppeln und die urbane Lebenswelt mit ausreichend Nahverkehr zu versehen und dann entstehende Grün- und Freiflächen beim Bau von neuen urbanen Stadtquartieren mit besonderen Qualitäten versehen. Letzteres umfasst Erholungsmöglichkeiten ebenso, wie eine verbesserte Lebens- und Umweltqualität sowie die Erhaltung/Verbesserung urbaner Artenvielfalt. Idealerweise würde man beide Ziele, also neue und mehr resiliente Lebenswelten, mit Emissionseinsparungszielen verbinden.

Um diese sogenannten »Co-Benefits« zu erzielen, sind oft Multikriterienanalysen in der Zeit erforderlich, denn der fortschreitende Klimawandel, oder auch Lebensstiländerungen können bedingen, dass Optionen welche heute für machbar identifiziert werden, in Zukunft womöglich gar nicht mehr existieren. Ein Beispiel hierfür ist die urbane und peri-urbane Landwirtschaft, welche oft als nachhaltige Lösung zur urbanen Nahrungsmittelversorgung vorgeschlagen wird. Im Diskurs wird auch wahrgenommen, dass die landwirtschaftliche Produktion und Ernährungsgewohnheiten insgesamt eine Klimadimension haben und zukünftig anders gestaltet werden sollte (Hic et al. 2016). Doch um die Vielschichtigkeit der Klimadimensionen und die Auswirkungen des individuellen Verhaltens, z.B. die Orientierung hin zu mehr Fleischkonsum zu verstehen, müssen die Vorteile der lokalen Produktion im Vergleich zu einer globalen Produktion abgewogen werden. Da globale Wertschöpfungsketten nicht immer ökologisch und ökonomisch von Nachteil sind, ist es erforderlich, dass solche Bewertungskriterien transparent und verständlich aufbereitet werden. Kriewald et al. (2019) haben gezeigt dass im Fall einer optimierten peri-urbanen Landwirtschaft bis zu 35% der Stadtbevölkerung lokal versorgt werden könnten. Würde man dies global zum Ziel machen, könnte man konservativ geschätzt ca 8% der globalen Transportemissionen (ohne Flugverkehr) vermeiden. Nicht immer ist dies jedoch eine Option. Fertile Böden können z.B. anderswo deutlich ertragreichere Ernten zulassen. Die Frage ob dies jedoch noch eine Option ist, wenn der Klimawandel, das urbane Wachstum, oder auch der Lebensstilwandel hin zu mehr Fleischkonsum fortschreitet, lässt sich nur durch eine multikriterielle Untersuchung in der Zeit beantworten (vgl. Kriewald et al. 2019). Es wird deutlich, dass alle dieser drei Faktoren den Optionenraum für eine peri-urbane Landwirtschaft im Jahr 2050 deutlich einschränken. Dies wird eindrucksvoll am Beispiel indischer Städte klar, denn hier ist die Option einer lokalen Landwirtschaft unter Bedingungen ungebremsten urbanen Wachstum, des Klimawandels sowie des Lebensstilwandels stark eingeschränkt. Insgesamt beläuft sich der Rückgang in lokalen Erträgen auf bis zu 50%, wobei der Faktor Stadtwachstum in dieser Region der bei weitem relevanteste ist. Demgegenüber ist es in weiten Regionen Afrikas der fortschreitende Klimawandel, welcher die Optionen für eine lokale Nahrungsmittelproduktion einschränken wird. Solche Beispiele verdeutlichen, wie schwierig eine Konsensfindung für klimaangepassten Strategien sein kann. Vor allem das Lösungen immer auch stark von Eingangsannahmen abhängen. Nur die Transparenz über die Grundannahmen sowie die Kriterien der Szenarienannahme kann aber die für eine zukunftsgerichtete und erfolgreiche Stadtplanung erforderliche obligatorische Beteiligung relevanter Gruppen der Zivilgesellschaft garantieren. So lassen sich Potentiale und Möglichkeiten von kommunalem Klimaschutz und Nachhaltigkeit ausreichend beleuchten. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass auf kommunaler Ebene ein enormes Transformationspotential besteht. Dieses sollte als Chance aufgefasst werden und nicht als Bedrohungszenario kommuniziert werden, wie dieses heute vielfach noch geschieht.

Tab. 6.13-1: *Globale und urbane Bevölkerungsentwicklung zwischen 1950 und 2050.*

Jahr	Globale Bevölkerung (in Mrd.)	Anteil urban	urbane Bevölkerung (in Mrd)	Einwohnerzahl für die neue urbane Infra- struktur erforderlich war bzw. ist (Mio./Dekade)
1950	2,54	29,5%	0,75	
				357
1985	4,87	41,0%	2,00	
				660
2015	7,38	53,9%	3,98	
				768
2050	9,77	68,3%	6,67	

Daten: United Nations (2019). Eigene Berechnungen.

Zusammenfassung: Vision urbanen Lebens im Jahr 2050

In diesem Aufsatz wurden unterschiedliche Dimensionen des urbanen Klimaschutzes und der Anpassung in Beziehung gesetzt. Die erfolgten Untersuchungen rekurrieren dabei auf den Status Quo und zeigen, welche Optionen heute verfolgt werden und sinnvoll sein könnten. Unabhängig hiervon ist es jedoch erforderlich darüber einen Diskurs zu starten, wie eine urbane Nachhaltigkeit bzw. urbanes Leben im Jahr 2050 aussehen kann. Es versteht sich von selbst, dass Änderungen der urbanen Infrastruktur, nicht einfach testweise werden können, denn dies wäre zu kostenintensiv. Es ist daher erforderlich zunächst eine Vision für das städtische Leben in 2050 zu entwickeln, durch eine tiefgehende wissenschaftliche Analyse den Optionenraum auszuleuchten, und die Ergebnisse zur Diskussion zu stellen. Dies muss nicht unbedingt, für jede Stadt einzeln geschehen, denn die oben diskutieren Beispiele haben gezeigt, das für Städte auch generische Faktoren gelten.

Um Nachhaltigkeit und Dichte zu vereinen, aber auch die Hitzebelastung und den Flächenverbrauch zu bekämpfen müssen wir von der zweidimensionalen Raumplanung wegkommen und urbane Konzepte zukünftig in der dritten Raumdimension entwickeln. Dies ist leider bisher unzureichend der Fall, aber Beispiele wie das »*1.000 Trees Project*«, Moganshan Road, in Shanghai China, das »*Ravel Plaza*« in Amsterdam/ Niederland, Netherland, oder auch das *Bosco Verticale* in Mailand/Italien weisen in die richtige Richtung. Solche Strukturen ermöglichen nicht nur ein verbessertes Stadtklima, sondern es vermindern auch die Lärmbelastung, verbessern das Stadtklima, eröffnen Möglichkeiten des sogenannten urbanen Gardenings und geben dem Raum insgesamt, eine völlig andere Wertigkeit. Dennoch ist die Innovation in der dritten Raumdimension nicht ausschließlich auf urbanes Grün beschränkt. In New York City wurden beispielsweise alte Hochbahnstrecken zu neuen Parkflächen und Fußgängerzonen umgewandelt (*New York Highline*). Solche Beispiele zeigen, dass Dichtefrust durchaus in eine »Dichtelust« umgewandelt werden kann, wenn die entsprechenden Lösungen innovativ angegangen werden. Zukünftig ist eine Vereinbarkeit von Wohnen, Arbeiten/ Produktion und Transport anzustreben und die Möglichkeiten der Digitalisierung wird dazu einen ganz anderen Handlungsrahmen schaffen, welcher konsequent und nachhaltig ausgeleuchtet werden muss. Um dies zu ermöglichen ist es jedoch erforderlich, nicht nur technologische Innovationen in den Vordergrund zu stellen, sondern sozialeInnovationen in gleichrangiger Weise zu fördern, denn nur Teilhabe garantiert Akzeptanz. Bereits heute existieren in vielen europäischen Städten Beispiele, wie Aktivitäten von Bürgern Nachhaltigkeit konkret leben und implementieren.

Danksagung

Viele der in diesem Aufsatz diskutierten Ergebnisse wurden in einem von der Europäischen Union im Rahmen des FP7 Programms geförderten Projekte, »RAMSES - Reconciling Adaptation, Mitigation and Sustainable Development in Cities« (www.ramses-cities.eu) erzielt.

Literatur

BÜTTNER G. T., T. SOUKUP & A. SOUSA (2007): CLC2006 technical guidelines, Tech. Rep. 17, Eur. Environ. Agency, Copenhagen.
CREUTZIG F., G. BAIOCCHI, R. BIERKANDT et al. (2015): Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. PNAS, 112: 201315545.
GUDIPUDI R., T. FLUSCHNIK, A. C. ROS et al. (2016): City Density and CO_2 Efficiency. Energy Policy, 91: 352-361.
GUDIPUDI R., D. RYBSKI, M. K. B. LÜDEKE et al. (2019): The efficient, the intensive, and the productive: insights from the urban Kaya relation. Applied Energy, 236: 155-162.
HIC C., P. PRADHAN, D. RYBSKI & J. P. KROPP (2016): Food surplus and its climate burden. Environmental Science and Technology, 50(8), 4269-4277.
HORNWEG D., L. SUGAR & C. L. TREJOS-GOMEZ (2011): Cities and greenhouse gas emissions: moving forward. Environment & Urbanization, 23(1): 207-227.
IEA (2008): World Energy Outlook 2008 (International Energy Agency, Paris).
KRIEWALD S., P. PRADHAN, L. COSTA et al. (2019): Hungry cities: how local food self-sufficiency relates to climate change, life styles and urbanisation. Environmental Research Lett., 14(9): 094007.
OKE T. R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. Q. J. R. Meteorol. Society, 108(455): 1-24.
RIBEIRO H. V., D. RYBSKI & J. P. KROPP (2019): Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions. Nature Communications 10: 3204.
RAMSES/VITO (2018): Climate change scenarios for urban agglomerations. Deliverable 4.2: Agglomeration-scale urban climate and air quality projections. EU FP7 project: *www.ramses-cities.eu.*
ROZENFELD H. D., D. RYBSKI, X. GABAIX & H. A. MAKSE (2011): The area and population of cities: New insights from a different perspective on cities, American. Econ. Rev., 101(5): 2205-2225.
TAHA H. (1997): Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, Energ. Buildings, 25: 99-103.
UNITED NATIONS (2019): World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Department of Economic and Social Affairs (ST/ESA/ SER.A/420). New York: United Nation, 103 pp
UN Environment (2017): Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. A Global Status Report. UNEP, New York,43pp.
ZHOU B., D. RYBSKI & J. P. KROPP (2013): On the statistics of urban heat island intensity. Geophysical Research Letters, 40: 5486-5491.
ZHOU B., D. LAUWAET, H. HOOYBERGHS et al. (2016): Assessing seasonality in the surface urban heat island of London. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55: 493-505.
ZHOU B., D. RYBSKI & J. P. KROPP (2017): The role of city size and urban form in the surface urban heat island. Scientific Reports, 7: 4791.

Kontakt:
Prof. Dr. Jürgen P. Kropp
Potsdam- Institut für Klimafolgenforschung
kropp@pik-potsdam.de

Kropp J. P. (2019): Stadtstruktur und Klimawandel: Warum sind urbane Transformationen so schwierig zu gestalten? In: Lozán J. L. S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 280-285. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.41.

6.14 Voraussetzung für einen wirksamen Klimaschutz: Die Verkehrswende in den Städten

Weert Canzler

Der Verkehr ist ein wachsendes Problem für den Klimaschutz, weil er nach wie vor fast vollständig auf fossilen Energieträgern beruht. Da insbesondere der Straßenverkehr viel Platz in Anspruch nimmt, wird zugleich der Ruf nach mehr Flächengerechtigkeit in der Stadt lauter. Daher nimmt der Druck zu, eine umfassende Verkehrswende einzuleiten. Dazu gehört ein Wechsel der Antriebstechnik mit dem Ziel der Dekarbonisierung, aber auch eine Änderung des Nutzungsverhaltens. Zugleich sind auch die Beharrungskräfte groß. Die Verkehrsinfrastruktur und die Siedlungs- und Lebensweisen eines großen Teils der Gesellschaft wurden seit Jahrzehnten auf das private Automobil hin ausgerichtet. Es gibt also eine mehrfache hohe Pfadabhängigkeit. Eine Verkehrswende geht weit über eine Antriebswende hinaus. Sie ist mit einem grundlegenden stadt- und siedlungsräumlichen Umbau verbunden. Dafür braucht sie veränderte rechtliche und steuerliche Rahmenbedingungen und einen umfassenden Kulturwandel. Realistischerweise beginnt die Verkehrswende mit kleinen Schritten. Es gilt zunächst in Pilotversuchen und Experimenten Erfahrungen zu sammeln und alternative Mobilitätszukünfte zu illustrieren.

Prerequisite for effective climate protection: The traffic turnaround in the cities - *Transport is a growing problem for climate protection, because it is still almost entirely based on fossil fuels. Since road traffic, in particular, takes up a lot of space, the call for more space justice in the city is becoming louder. This is why there is increasing pressure to initiate a comprehensive traffic turnaround. This includes not only a change in drive technology with the aim of decarbonisation, but also a change in user behaviour. At the same time, the inertia is also great. The transport infrastructure as well as settlement structure and life style of a large part of society have been geared towards the private automobile for decades. There is therefore a high path dependence. A traffic turnaround goes far beyond a drive turn. It means a fundamental urban and settlement redevelopment.It needs a changed legal and fiscal framework and also a comprehensive cultural change. Realistically, the turnaround begins with small steps. The first step is to gather experience in pilot projects and experiments and to illustrate alternative mobility solutions.*

Sorgenkind Autoverkehr

Wenn wir von Verkehr reden, meinen wir vor allem den motorisierten Straßenverkehr. Der wird vom Pkw dominiert. Mehr als zwei Drittel der Emissionsbelastungen des Straßenverkehrs gehen auf seine Rechnung. Jahr für Jahr nimmt in Deutschland die Zahl der zugelassenen Pkw zu. Mittlerweile sind es ungefähr 47 Millionen (Kraftfahrtbundesamt 2018). 83 Millionen Einwohner haben mindestens 200 Millionen fahrbare Sitzplätze zur Verfügung. Die Attraktivität des eigenen Autos ist offenbar ungebrochen. Dabei wissen alle, dass gerade in der Stadt ein Auto viel knappen Platz braucht, den öffentlichen Raum über Gebühr in Anspruch nimmt und viele straßennahe Wohnlagen unattraktiv macht.

Kein Sektor ist so weit entfernt von dem Ziel, Treibhausgasemissionen zu senken wie der Verkehr. Seit nunmehr 25 Jahren sind diese Emissionen im Verkehr, die zu mehr als vier Fünftel dem Straßenverkehr geschuldet sind, mit leichten Schwankungen auf dem gleichen Niveau. In allen Sektoren gab es Fortschritte, sogar in der Landwirtschaft. Nur im Verkehr, prä-



Radwege in Utrecht in Holland (Fotos W. Canzler).

ziser: im alles dominierenden motorisierten Straßenverkehr, tut sich in Sachen Klimaschutz nichts (Agora Verkehrswende 2017: 11). Alle fahrzeugtechnischen Effizienzgewinne wurden bisher durch mehr Straßenverkehr und durch mehr bzw. größere Fahrzeuge zunichte gemacht. Außerdem hat sich die Schere zwischen dem Verbrauch gemäß Herstellerangaben und dem realen Verbrauch auf der Straße über viele Jahre weiter geöffnet, der Unterschied beträgt derzeit ungefähr 40 Prozent (vgl. ICCT 2019). Wenn es nicht gelingt, die Verkehrswende endlich umzusetzen, werden die Ziele des Klimaschutzabkommens von Paris, nämlich eine weitgehende Dekarbonisierung aller Sektoren, nicht erreicht.

Die CO_2-Emissionen des auf der Verbrennungsmotortechnik beruhenden motorisierten Verkehrs müssen aber drastisch sinken. Das bedeutet eine schnelle Trendumkehr. Danach sieht es derzeit überhaupt nicht aus. Das Auto ist auch deshalb ein so großes Problem für den Klimaschutz und für den Ressourcenverbrauch, weil es die Tendenz hat, größer, schwerer und höher motorisiert zu werden. Aktuell ist das Pkw-Segment, das am stärksten wächst, das der *Sport Utility Vehicles* (SUV) und der Geländewagen. Diese Autos sind gerade für die Stadt vollkommen ungeeignet.

Die Dominanz des Autos ist nicht zufällig entstanden, sie war über viele Jahre politisch gewollt. Das private Auto gehörte zum bundesdeutschen »Wohlstandsmodell«. Es gab in der Nachkriegszeit, insbesondere seit Ende der 1950er Jahre, einen breiten politischen und gesellschaftlichen Konsens darüber, dass das »Auto für alle« Teil eines »gelungenen modernen Lebens« ist. In deutschen Städten und ebenso in anderen früh motorisierten Ländern wurde lange Zeit das Planungsideal der »autogerechten Stadt« verfolgt (Canzler et al. 2018). Auch wenn die Ziele der heutigen Stadtentwicklungspläne mittlerweile ganz anders aussehen, ist die Hypothek der früheren Raum- und Stadtentwicklung nur schwer abzutragen. Zwar werden seit einigen Jahren in den meisten kommunalen Verkehrsplänen ein Zurückdrängen des Autos, die Förderung des Öffentlichen Verkehrs und auch die Unterstützung für den »aktiven Verkehr« zu Fuß und mit dem Fahrrad gewünscht. Aber der Verkehrsalltag ist nach wie von den Ergebnissen einer jahrzehntelangen aktiven Autoförderung geprägt.

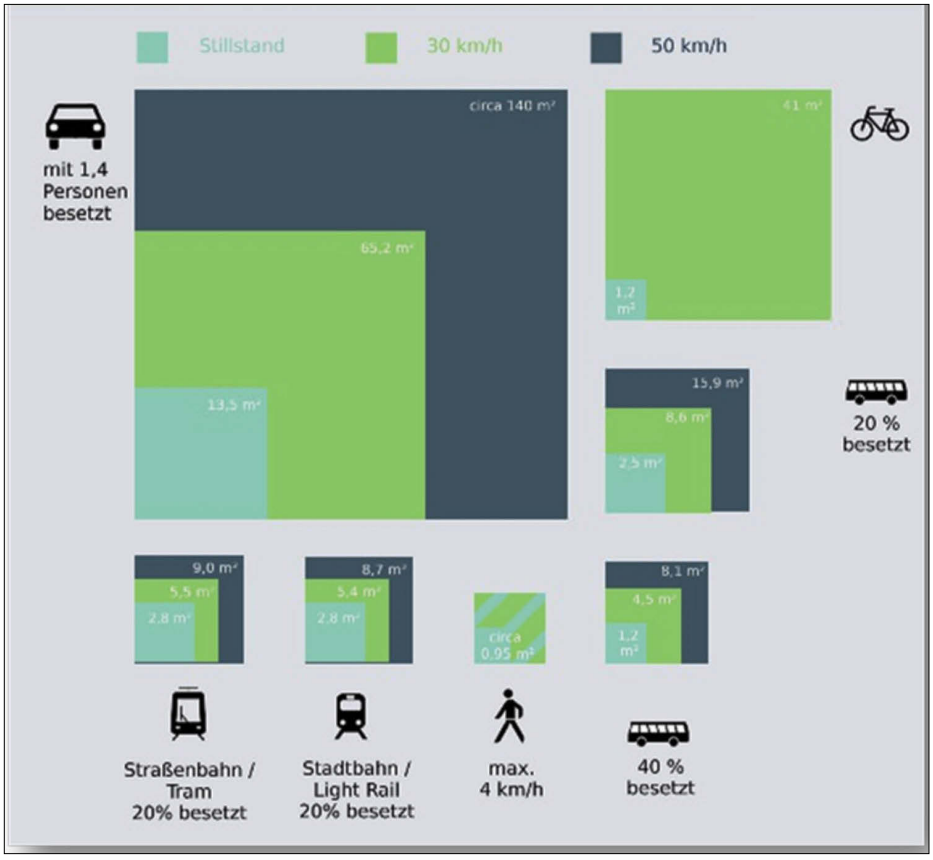


Abb. 6.14-1: *Flächeninanspruchnahme verschiedener Verkehrsmittel (Quelle: Randelhoff 2015).*

Die in Beton und Asphalt geronnene Realität der autogerechten Stadt gehört neben der am Leitbild der »Rennreiselimousine« orientierten Autoindustrie und dem Routine- und Bequemlichkeitsgewinn für die Nutzerinnen und Nutzern zu den Beharrungskräften des Automobilismus (vgl. Canzler 2016). Eine Verkehrswende zu anderen Verkehrsmitteln mit weniger und zudem elektrisch betriebenen Autos ist daher ein hoch ambitioniertes Vorhaben. Allein schon bei der überfälligen Elektrifizierung der Antriebe zeigt sich, wie stark die Widerstände auf Seiten der Autoindustrie, aber auch bei vielen Autofahrenden sind. Die gewohnten Standards bei der Reichweite und Tankstellendichte werden als nicht verhandelbarer Maßstab betrachtet. Dabei ist die Elektromobilität nur eine notwendige, aber keinesfalls hinreichende Voraussetzung für die Verkehrswende. Diese bedarf nicht nur radikaler technischer Innovationen, sondern ebenso eines umfassenden stadt- und siedlungsräumlichen Umbaus und last but not least erheblicher Verhaltensänderungen. Letztlich zielt eine Verkehrswende auf eine neue Verkehrskultur.

Herausforderungen der städtischen Verkehrswende

Nicht nur die fossilen Antriebstechniken und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen sind ein Problem. Der überbordende motorisierte Individualverkehr braucht einfach auch viel Platz – und zwar sowohl wenn er fließt als auch wenn er ruht (siehe *Abb. 6.14-1*). Die massenhafte Autonutzung kommt in ihrem Platzbedarf schon seit Jahren in den Metropolen der Welt an ihre Grenze bzw. hat diese längst überschritten. Es stockt und staut sich, die Luft ist schlecht und der öffentliche Raum wird dominiert von fahrenden oder stehenden Fahrzeugen.

Gerade der so genannte ruhende Verkehr braucht viel Platz. Private Autos stehen durchschnittlich mehr als 23 Stunden am Tag herum. SUVs brauchen zusätzlichen Platz und versperren Fußgehern oft den Weg und noch häufiger die Sicht. Gleichzeitig beginnt jedes Mal ein heftiger Kulturkampf, wenn eine Kommune den öffentlichen Parkraum zurückbauen und eine andere Nutzung von Verkehrsflächen ermöglichen will. Betroffene Privatautomobilisten fühlen sich ihres Gewohnheitsrechtes beraubt und protestieren lautstark und oft mit Unterstützung populistischer Parteien und Medien. Oft beklagen Einzelhändler, dass ihre Kunden wegbleiben, wenn sie nicht schnell und einfach in unmittelbarer Nähre des Geschäftes parken können. Sie verteidigen das innerstädtische und geschäftsnahe Parken als letztes Bollwerk gegen den bedrohlichen Online-Handel. Der Widerstand der tatsächlichen und vermeintlichen Verlierer einer Neuverteilung des öffentlichen Verkehrsraum zulasten des Autos ist oft lautstark, während sich bei den potenziellen Gewinnern einer neuen urbanen Raumnutzung nichts rührt; sie sind leise, organisieren sich kaum und werden im öffentlichen Diskurs nicht wahrgenommen.

In Zeiten der Urbanisierung steigt jedoch der Druck, den städtischen Raum besser zu nutzen. Alternative Nutzungen verhindernde und kaum vergütete Stellplatzflächen für Pkw kann sich keine wachsende Stadt leisten. Für die Städte geht es künftig zum einen darum, durch eine systematische und kostenorientierte Parkraumbewirtschaftung den Kostendeckungsgrad zu erhöhen. Nach Schätzungen liegt der in Europa im Schnitt bei gerade einmal 23 Prozent (Randelhoff 2016). Zum anderen geht es ganz grundsätzlich um eine andere Nutzung des öffentlichen Raumes. Es ist schwer zu rechtfertigen, dass kaum genutzte private Automobile mit einer beanspruchten Grundfläche von mindestens 12 Quadratmetern ohne oder für eine geringe symbolische Gebühr den öffentlichen Raum in Beschlag nehmen, während Wohnungen und Schulen, aber auch Areale für urbane Freizeit-und Erholungsaktivitäten dringend gebraucht werden.

Eine große Herausforderung ist es, das eingespielte Nutzungsverhalten vieler Autofahrenden zu verändern. Die Nachfrage auf dem »Verkehrsmarkt« wird zwar nicht nach Wegen, aber nach Kilometerleistung in der Stadt, vor allem am Stadtrand und auf dem Lande eindeutig vom Auto dominiert. Drei Viertel der Verkehrsleistung im Personenverkehr wird vom Auto erbracht, das ist ein annähernd konstanter Wert seit mehr als 10 Jahren (vgl. infas 2019a). Aber das Nachfrageverhalten folgt keinem Naturgesetz, es ist historisch gewachsen und das Ergebnis eines jahrzehntelangen automobilzentrierten Infrastrukturausbaus einschließlich der rechtlichen Absicherung des Parkens mit einer Stellplatzpflicht und dem Gemeingebrauch der Straße für den »ruhenden Verkehr«. Schließlich hat es auch mit (Fehl)anreizen zu tun. Zu diesen Fehlanreizen gehören beispielsweise neben einer fehlenden Parkraumbewirtschaftung und dem Dienstwagenprivileg auch steuerliche Vergünstigungen wie die Entfernungspauschale und der als gezielte Förderung des Dieselantriebs beschlossene reduzierte Steuersatz für Dieselkraftstoff. Dass diese Vergünstigungen und Subventionen abgebaut werden müssen, ist in Fachkreisen seit langem Konsens. Politisch ist ein solcher Privilegienabbau jedoch bisher nicht umgesetzt worden. Wie bei jedem Abbau von Privilegien stehen auch hier konkrete Interessen von drohenden Verlierern eher abstrakte Vorteile für unsichere und diffuse Gewinne gegenüber.

Die Herausforderung der Verkehrswende ist eine dreifache: Technische *lock-ins*, eine verfestigte Autoabhängigkeit gerade von nicht-städtischen Haushalten und fehlender politischer Mut sind wichtige Gründe, warum sich im Autoverkehr so wenig tut. Dennoch gab es in den letzten Jahrzehnten immer wieder Versuche, aus der problematischen Motorisierungsdynamik herauszukommen und auf der Verhaltensseite einen Alternativweg zum privaten Automobil aufzubauen. Schon länger gilt das Carsharing, also das organisierte Teilen von Autos als eine Möglichkeit, die vorhandenen Fahrzeuge effizienter zu nutzen (vgl. Petersen 1995 und Knie 1997). Die Hoffnung war von Anfang an, die Mobilitätsbedürfnisse mit weniger Autos zu befriedigen. In den 1980er Jahren in der Nische der Alternativbewegung entstanden, hat sich das Carsharing mittlerweile professionalisiert. Etablierte Autohersteller haben ihre eigenen Carsharing-Marken auf den Markt gebracht, jüngst hat der Autovermieter Sixt ein ambitioniertes Carsharing-Programm gestartet. Neben das stationsbasierte ist das in einem definierten Gebiet frei verfügbare, das so genannte *free-floating Carsharing* mittlerweile verbreitet.

Trotz beeindruckender Wachstumszahlen sind die Erwartungen – und zum Teil auch die Hoffnungen – nicht erfüllt worden. Zwar waren Ende 2018 mehr als 2,4 Millionen Kunden bei den Carsharing-Anbietern angemeldet (BCS 2019). Doch kann diese Zahl nicht darüber hinwegtäuschen, dass der Marktanteil des Carsharings bisher sehr bescheiden ist. Nicht mehr als 20.00 Fahrzeuge werden im Carsharing-Betrieb genutzt, der Anteil am modal split lässt sich kaum messen. Vor allem sind Reduktionen bei den Gesamtzulassungszahlen nicht ersichtlich, mögliche Pkw-Abmeldungen von Carsharern oder auch Nicht-Anmeldungen ansonsten erworbener Privat-Pkw sind nicht nachzuweisen. Carsharing wird bisher vielfach als zusätzliches Verkehrsangebot genutzt oder es wird als »Versicherungsoption« von denen betrachtet, die ihren Verkehrsalltag sowieso bereits ohne eigenes Auto organisiert haben.

Keine Verkehrswende ohne veränderte Rahmenbedingungen

Auch wenn das Carsharing von der Durchsetzung des Smartphones und von der Etablierung smarter Dispositions-Algorithmen erheblich profitiert, hat es bisher nicht den vielfach erwarteten Anteil zur Verkehrswende beitragen können. Zwar sind Carsharing-Angebote in vielen Städten mittlerweile verfügbar, doch sind die meisten kleineren Städte und vor allem das Land noch weiße Flecken beim organisierten Autoteilen. Von einem Boom des Autoteilens kann keine Rede sein, das Carsharing ist keine verbreitete soziale Praxis.

Offensichtlich ersetzt ein neues Angebot einer effizienteren Fahrzeugnutzung wie das Carsharing keine aktive Verkehrswendepolitik. Solange beispielsweise das Abstellen privater Autos im urbanen öffentlichen Raum wenig oder gar nichts kostet und Anwohner mit einer für einen symbolischen Preis erhältlichen Plakette von einer Nutzerfinanzierung sogar ausgenommen werden, gibt es auch für Carsharer keinen Anreiz, den vorhandenen Privatwagen abzuschaffen. Sie behalten ihn einfach. Erfolgversprechend im Sinne einer Reduktion der Fahrzeugmengen ist die Kombination von neuen Angeboten wie Carsharing und ein erweiterter ÖPNV zusammen mit dem Abbau des Privilegs, das private Auto einfach und fast ohne Kosten im öffentlichen Raum abzustellen.

Überhaupt ist für die Verkehrswende eine neue Raumverteilung entscheidend. Ohne eine Umwidmung von Autostraßen und Parkflächen für andere Verkehrsmittel, in erster Linie für Fahrradwege und Busspuren, wird keine Flächengerechtigkeit erreicht. Es bedarf einer konsequenten »*push-and-pull-Strategie*« in der städtischen Verkehrsflächenpolitik. Das heißt: weniger Platz für das private Auto und mehr Platz für Alternativen zum privaten Auto sowie für urbane Aktivitäten und Bedürfnisse. Zunehmend werden weitere Ansprüche an bisher für den Autoverkehr vorgehaltene öffentliche Flächen gestellt. Um mehr Effizienz in der Nutzung öffentlicher Flächen zu erreichen, könnten schließlich geteilte Fahrzeuge im Zug einer Staffelung von Parkgebühren bevorteilt werden. Auch das würde das Carsharing unterstützen.

Ebenso wichtig wie eine »*push-and-pull-Strategie*« bei der Flächenpolitik ist es, dass das Carsharing eng mit dem Öffentlichen Verkehr verknüpft ist und letztlich zum integralen Bestandteil des ÖV wird. Für diese Verknüpfung gibt es bereits einige Erfahrungen. Neben der tariflichen Integration und gegenseitigen Rabattoptionen ist es hilfreich, dass der Zugang über eine App oder Karte und die Abrechnung aus einer Hand möglich wird. Ein wichtiger Hebel für die angestrebte Integration ist im Übrigen der Zugriff und die Verfügbarkeit von Anbieter- und Nutzerdaten, hier führt kein Weg an einer Pflicht zu open data vorbei (vgl. BMVI 2019).

Für die urbane Verkehrswende ist schließlich von besonderer Relevanz, dass die aktive Mobilität – also das Zufußgehen und das Radfahren – den notwendigen Platz bekommt. Fuß- und Radwege müssen breit genug sein, einen guten Untergrund haben und vor allem sicher sein. Geschützte Radwege können gerade diejenigen zum Radfahren bringen, die eigentlich das Rad nutzen möchten, sich das aber im anspruchsvollen städtischen Verkehr nicht trauen (vgl. Gehl 2015). Die Erfahrungen aus Dänemark und den Niederlanden, aber auch aus

einigen US-amerikanischen Städten zeigen, dass Radwege dann besonders stark frequentiert werden, wenn sie durch Poller oder andere bauliche Maßnahmen von Autostraßen abgetrennt sind. Das Zauberwort der Verkehrsplaner heißt geschützter Fahrradweg. Ein eigenes Fahrradwegenetz ohne gefahrenträchtige Kreuzungen mit Autostraßen, wie es beispielsweise in Neubauquartieren in der niederländischen Stadt Utrecht gebaut wurde, gilt hier als richtungsweisend. Der potenzielle Anteil der Wege mit dem Rad oder zu Fuß ist groß, wenn man sieht, dass derzeit in Deutschland die allermeisten Wege mit dem Auto gemacht werden, die zwischen einem und fünf Kilometer liegen (siehe *Abb. 6.14-2).*

Positive Aussichten: Automatisiertes Fahren und veränderte Einstellungen

Veränderte und auf die Stärkung der Alternativen zum privaten Auto zielende Rahmenbedingungen sind eine notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Verkehrswende in der Stadt. Die schwierige und konfliktreiche Neuaufteilung des Verkehrsraumes ist ebenfalls unumgänglich, dazu gehört nicht zuletzt, mehr geschützte Zufuß- und Radwege einzurichten. Schließlich muss der Öffentliche Verkehr mehr sein als ein »Resteverwerter«. Der ÖV ist attraktiv, wenn er zuverlässig ist, im engen Takt fährt und mit zusätzlichen flexiblen Angeboten wie auch einem Car- und Bikesharing verbunden ist. Auch das Automatisierte Fahren bietet in diesem Zusammenhang neue Chancen. Shuttles mit acht, zehn oder zwölf Plätzen können eine flexible Ergänzung für Bus- und Bahnlinien sein. Solche automatisiert fahrenden Shuttles können die erste und letzte Meile bequem und bedarfsgerecht bedienen (ausführlich: Canzler et al. 2019).

Automatisierte Shuttles, die im Bedarfsfall angefordert werden und ansonsten sich selbst disponieren, sind besonders dort hilfreich, wo es weder Bahn- noch Busanbindungen gibt oder wenn die Nachfrage am Abend oder in der Nacht einfach zu gering ist, um einen Regelbetrieb einzurichten. Damit sind sie gerade in städtischen Randlagen und für Pendler als Zubringer zu Bushaltestellen oder Bahnhöfen interessant. Noch gibt es solche Shuttles lediglich als Prototypen, sie fahren in einigen Testgebieten und ausschließlich mit Sondergenehmigungen. Ob sie das theoretische Potenzial als flexible Ergänzung des ÖV ausschöpfen können, hängt außer einigen noch zu lösenden technischen Herausforderungen davon ab, ob die rechtlichen Voraussetzungen für einen Regelbetrieb geschaffen werden und ob die ÖV-Betreiber sie in ihr Angebot integrieren.

Noch ist nicht wirklich klar, ob automatisiert fahrende Fahrzeuge überhaupt von den Kundinnen und Kunden akzeptiert werden. Auch sind noch nicht alle Haftungsfragen geklärt und die möglichen Kosten für Betreiber und die Kunden sind ebenfalls noch offen. Dennoch ist davon auszugehen, dass die grundsätzliche Bereitschaft, solche Angebotsinnovationen zu nutzen, vorhanden ist. Das zeigen die Befragungen der Test-

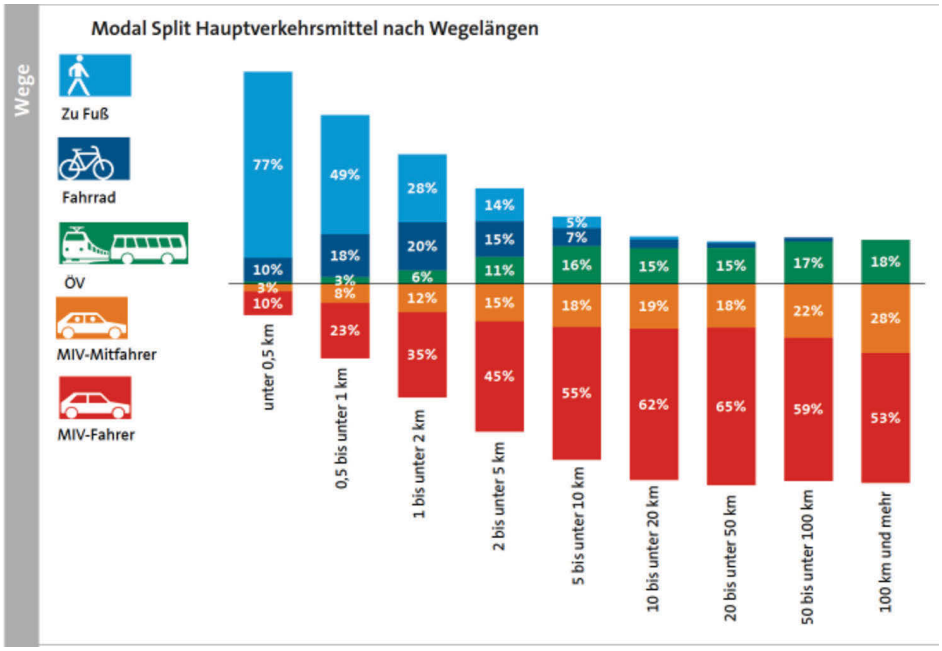


Abb. 6.14-2: *Länge der mit Pkw gemachten Wege. Quelle: infas (2017). Etappenkonzept, Bonn 2019, S. 23.*

nutzer, sie äußern sich mehrheitlich sowohl über ihre Erfahrungen als auch über mögliche künftige Einsatzmöglichkeiten positiv (vgl. Hunsicker et al. 2017).

Bei der Automatisierung von Fahrfunktionen ist allerdings noch offen, ob der Schwerpunkt bei neuen Fahrzeugformaten oder nicht eher bei der Aufrüstung und damit bei der »Laufzeitverlängerung« des klassischen Privatautos liegen wird. Dann geht es darum, das automatisierte Fahren auf der Autobahn sowie eigenständiges Parken als Regelfunktion einzuführen. Ansonsten würde sich nichts ändern, das alte Autoleitbild wäre nicht berührt. Bisher forschen und entwickeln die Autohersteller fast nur auf diesem Innovationsweg. Alternativ bietet sich ein radikal anderes Zukunftsmodell an, nämlich tatsächlich sich selbst disponierend agierende Fahrzeuge zu entwickeln, die sich nicht in individuellem Besitz der Nutzer befinden, sondern Teil einer Mobilitätsdienstleistung sind. Daran arbeiten derzeit die kalifornischen Digitalunternehmen. Dieser Entwicklungspfad ist riskanter, zugleich würde er den Abschied von der traditionellen Automobilität – im wörtlich übersetzen Sinne der Selbstbeweglichkeit – bedeuten. Denn wirklich autonom fahrende Fahrzeuge, auch die Shuttles als Ergänzung und Teil des klassischen Öffentlichen Verkehrs, erlauben es den Nutzer nicht mehr, zu steuern. Im Gegenteil, der und die Gefahrene darf nicht mehr eingreifen. Die damit verbundenen ethischen Fragen und auch die Haftungsübernahme sind ebenso wenig beantwortet wie die Frage, wie denn eigentlich der Verkehrsraum und letztlich der städtische Raum aus- bzw. zugerichtet werden muss, damit vollautonome Fahrzeuge unterwegs sein können.

Generell gibt es Hinweise darauf, dass sich die verkehrspolitischen Einstellungen verändern bzw. in jüngster Zeit bereits verändert haben (vgl. BMU/UBA 2019 und Ruhrort 2019). Zu beobachten sind ein gestiegenes Problembewusstsein und eine bisher unbekannte Offenheit gegenüber der anstehenden Verkehrswende. Vielfach wird eingesehen, dass es ohne Restriktionen im Verkehr nicht gehen wird. Diese Einstellungsänderungen sind nicht zuletzt verkehrspolitisch relevant. Denn verkehrspolitische Maßnahmen, die auf den Abbau der Privilegien des privaten Autos zielen, galten lange als »politischer Selbstmord«. Nunmehr gibt es offenbar eine größere Unterstützung auch beispielsweise von Vorschlägen wie die Umwidmung von Autofahrstreifen zu Busspuren oder Radwegen (vgl. Andor at al. 2019). Temporäre Fahrverbote für besonders emissionsbelastende Dieselfahrzeuge in Belastungssituationen finden ebenso deutliche Mehrheiten. Bei weitergehenden Vorschlägen wie einer City-Maut oder auch der zeitweisen Sperrung von Innenstädten gibt es immerhin starke Minderheiten, die das unterstützen. Selbst bei einem Tempolimit auf Autobahnen, was viele Jahre als verkehrspolitisches »no-go« behandelt wurde, gibt es möglicherweise eine Mehrheit (vgl. KfW 2018).

Insgesamt scheint Bewegung in ein Politikfeld zu kommen, das oft als vermint betrachtet wurde und in dem starke Vetospieler wie die organisierte Autoindustrie, der ADAC oder auch das überaus konservative Verkehrsministerium eine Verkehrswende mit einer Stärkung der Alternativen zum privaten Auto unwahrscheinlich machten. Die fehlenden klimapolitischen Fortschritte, der Dauerstau vielerorts, die aufgekommene Diskussion um Flächengerechtigkeit in den Städten und nicht zuletzt die Dieselkrise erlauben ein »weiter-so« nicht mehr. Mittlerweile ist nach einer Phase der Unsicherheit auch die Einschätzung des diskursiven Mainstreams, dass der Verbrennungsmotor ein Auslaufmodell ist und dass die Elektrifizierung kommt. Der Strategiewechsel von Volkswagen und das Umsteuern einiger großer Zulieferer in Richtung Elektromobilität beschleunigt den Ausstieg aus der Verbrennungsmotortechnik nunmehr auch faktisch.

Am Trend zur Elektrifizierung und mehr noch an dem zur Automatisierung zeigt sich, dass es dabei nicht nur um technische Entwicklungen geht. Die Realisierung bestimmter technischer Varianten werden nur möglich, wenn die rechtlichen und infrastrukturellen Voraussetzungen dafür geschaffen werden. Zugleich bedürfen sie der Akzeptanz sowohl auf Nutzerseite aus auch bei den Stadtbewohnern. Damit verbunden sind tiefgreifende Änderungen im Nutzungsverhalten. Das gilt auch insgesamt für die Verkehrswende. Ein Wechsel hin zu einer post-automobilen Verkehrswelt, in der das Rückgrat ein attraktiver und um flexible Mobilitätsbausteine erweiterter Öffentlicher Verkehr und eine viel bedeutsamer gewordene aktive Mobilität ist, bedeutet ebenso grundlegende Verhaltensänderungen.

Verhaltensänderungen sind gerade im Verkehr schwierig, weil Verkehrshandeln üblicherweise Routinehandeln ist (vgl. Canzler 2016). Routinen zu verändern, ist in jedem Fall mühsam. Es gibt eine Chance darauf am ehesten in Situationen des Routinebruchs, also in grundlegenden Änderungen von Lebensumständen wie Arbeitsplatzverlust, Scheidung oder Tod des Partners. Auf Routinebrüche folgende Phasen des Übergangs erlauben auch Verhaltensänderungen bei den täglichen Wegen. Verhaltensänderungen sind darüber hinaus dann möglich und wahrscheinlich, wenn überzeugende Alternativangebote tatsächlich vorhanden sind. Das kann in Testsituationen oder in Pilotversuchen, also in arrangierten temporären Ausnahmen von der Regel, gelingen. Deshalb spricht alles dafür,

zunächst einmal Experimente zu machen, auch und gerade in der Nutzung Automatisierter Shuttles als Teil eines neuen Öffentlichen Verkehrs.

Keine Verkehrswende ohne neue Verkehrskultur

Weil Verkehr das Problem für den Klimaschutz ist und sein Platzbedarf die Frage nach mehr Flächengerechtigkeit in der Stadt aufwirft, steigt der politische Handlungsdruck enorm. Zugleich sind die Beharrungskräfte immens, denn nicht nur die Verkehrsinfrastruktur, sondern auch die Siedlungs- und Lebensweisen eines großen Teils der Gesellschaft sind seit Jahrzehnten auf das private Automobil hin ausgerichtet. Es gibt eine mehrfache hohe Pfadabhängigkeit. Zugleich ist die Verkehrspolitik ein komplexes Politikfeld, in dem radikale Reformansprüche bisher kaum erhoben werden.

Hinzu kommt, dass eine Verkehrswende viel mehr als eine – auch bereits hochambitionierte – Antriebswende ist. Sie ist mit einem grundlegenden stadt- und siedlungsräumlichen Umbau verbunden und sie bedarf neuer rechtlicher und steuerlicher Rahmenbedingungen. Letztlich kommt sie ohne einen umfassenden Kulturwandel nicht aus. Das bedeutet sehr viel Veränderung auf einmal und ist zumindest kurzfristig wenig wahrscheinlich. Es spricht daher viel dafür, mit kleinen Schritten zu beginnen und zunächst Pilotversuche und Experimente für eine alternative Mobilität zu starten.

Experimente im Verkehr müssen überschaubar sein und revidiert werden können. Sie finden in den Kommunen statt, in einzelnen Quartieren, Straßen bzw. auf dem Campus oder im Gewerbehof. Doch selbst wenn eine Kommune einen Versuch starten will, hat sie oft nicht die nötigen Kompetenzen und Mittel. Pilotversuche für die Verkehrswende beginnen damit, dass auf Bundesebene die Voraussetzungen geschaffen werden, dass Kommunen überhaupt handeln können. Sie brauchen Rechtssicherheit, Know how und einen Anreiz, auch Risiken einzugehen. Hierfür kann der Bund viel tun, er kann Experimentierklauseln ausweiten, Wettbewerbe ausschreiben und den Know how-Transfer organisieren.

Schließlich brauchen Kommunen positive Beispiele, die ermutigen. Da hilft derzeit ein Blick ins Ausland. Am weitesten sind beim Radverkehr Kopenhagen und beim Ab- und Rückbau von Parkplätzen Amsterdam. Auch Oslo, Barcelona oder Helsinki sind sehr ambitioniert, wenn es um die Stärkung der Alternativen zum privaten Auto geht. Dort stößt im Übrigen die Verkehrswende mittlerweile auf breite Unterstützung der Bewohner, weil ihre Vorteile sicht- und erlebbar werden. Es zeigt sich bei diesen vorbildlichen Beispielen, dass sich eine neue Verkehrskultur im Prozess der Transformation entwickelt.

Literatur

AGORA VERKEHRSWENDE (2017): 12 Thesen, Berlin 2017, S. 11 (*https://www.agora-verkehrswende.de/12-thesen/*. Abgerufen 14.9.2019).

ANDOR M., M. FRONDEL, M. HORVATH, T. LARYSCH & L. RUHRORT (2018): Präferenzen und Einstellungen zu vieldiskutierten verkehrspolitischen Maßnahmen: Ergebnisse einer Erhebung aus dem Jahr 2018. RWI-Materialien, Heft 131, Essen 2019. *http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-materialien/rwi-materialien_131.pdf. Abgerufen* 24.8.2019.

BCS (Bundesverband Car Sharing) (2019): Aktuelle Zahlen und Daten zum Carsharing. *https://carsharing.de/alles-ueber-carsharing/carsharing-zahlen*. Abgerufen 15.9.2019.

BMU/UBA (2018): Umweltbewusstsein in Deutschland, Dessau 2019. *https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/ubs2018_-_m_3.3_basisdatenbroschuere_barrierefrei-02_cps_bf.pdf*. Abgerufen 15.8.2019.

BMVI (2019): Open data. *https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/open-data.html*. Abgerufen 15.9.2019.

CANZLER W. (2016); Automobil und moderne Gesellschaft. Beiträge zur sozialwissenschaftlichen Mobilitätsforschung, Berlin/Münster 2016.

CANZLER W., A. KNIE & L. RUHRORT (2019): Autonome Flotten. Mehr Mobilität mit weniger Fahrzeugen, München.

CANZLER W., A. KNIE & L. RUHRORT & C. SCHERF (2018): Erloschene Liebe? Das Auto in der Verkehrswende. Soziologische Deutungen, Bielefeld 2018.

GEHL J. (2015): Städte für Menschen, Berlin 2015.

HUNSICKER F., A. KNIE, G. LOBENBERG, D. LOHRMANN, U. MEIER, S. NORDHOFF & S. PFEIFFER (2017): Pilotbetrieb mit autonomen Shuttles auf dem Berliner EUREF-Campus – Erfahrungsbericht vom ersten Testfeld zur integrierten urbanen Mobilität der Zukunft, in: Internationales Verkehrswesen (69) 3/2017, Baiers-bronn.

ICCT (International Council on Clean Transportation) (2019): From Laboratory to Road. A 2018 Update of Official and »Real-world« Fuel Consumption and CO2 Values for Passenger Cars in Europe. *www.theicct.org/sites/default/files/publications/Lab_to_Road_2018_fv_20190110.pdf.* Abgerufen 03.09.-2019.

INFAS (Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Mobilität in Deutschland – MiD) (2019): Ergebnisbericht, Bonn 2019a. *http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf. Abgerufen* 15.9.2019.

KfW (2018): KfW-Research, Bevölkerung in Deutschland hält »Verkehrswende« für nötig – Mehrheit für Tempolimit auf Autobahnen 2018, *https://presseforum.at/kfw-research-bevoelkerung-in-deutschland-haelt-verkehrswende-fuer-noetig-mehrheit-fuer-tempolimit-auf-autobahnen/*. Abgerufen 15.8.2019.

KNIE A. (1997): Eigenraum und Eigenzeit: Zur Dialektik von Mobilität und Verkehr, in: Soziale Welt (47. Jg.), Heft 1/1997. 39-55.

KNIE A. (1999): Plan zur Abschaffung des Privat-Automobils. Ein verkehrspolitischer und wissenschaftssoziologischer Feldversuch, in: Schmidt, Gert (Hg.), Technik und Gesellschaft. Jahrbuch 10. Frankfurt/M. Campus 1999. S. 129-147.

KRAFTFAHRTBUNDESAMT (2018): Jahresbilanz der Neuzulassungen, Flensburg 2018. *https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/n_jahresbilanz.html*. Abgerufen 15.8.2019.

PETERSEN M. (1995): Ökonomische Analyse des Car-Sharing, Wiesbaden 1995.

RANDELHOFF M. (2015): Vergleich unterschiedlicher Flächeninanspruchnahmen nach Verkehrsarten, 2015, in: blog »Zukunft Mobilität«: *www.zukunft-mobilitaet.net/78246/analyse/flaechenbedarf-Pkw-fahrrad-bus-strassenbahn-stadtbahn-fussgaenger-metro-bremsverzoegerung-vergleich/. Abgerufen* 6.9.2019.

RANDELHOFF M. (2016): Die größte Ineffizienz des privaten Pkw-Besitzes: Das Parken, 2016, in: blog »Zukunft Mobilität«: *https://www.zukunft-mobilitaet.net/13615/strassenverkehr/parkraum-abloesebetrag-parkgebuehr-23-stunden/. Abgerufen* 15.8.2019.

RUHRORT L. (2019): Transformation im Verkehr. Erfolgsbedingungen verkehrspolitischer Maßnahmen. Wiesbaden 2019.

Kontakt:
Dr. phil. habil Weert Canzler
Wissenschaftszentrum Berlin
für Sozialforschung gGmbH
weert.canzler@wzb.eu

Canzler W. (2019): Voraussetzung für einen wirksamen Klimaschutz: Die Verkehrswende in den Städten. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 286-292. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.42.

6.15 Mehr Bildung für einen besseren Klimaschutz ?

Heike Zimmermann-Timm

»All we need is the will to change...«, waren die Worte von Rajendra Kumar Payuri, dem ehemaligen Vorsitzenden des Weltklimarates, bei der Vorstellung des Sachstandsberichtes 2014. Obgleich das Problembewusstsein für Fragen des Umwelt- und Klimaschutzes zugenommen hat, musste man feststellen, dass das Bewusstsein allein nicht ausreicht, um Menschen zum Handeln zu bewegen und Veränderungsprozesse einzuleiten. Inzwischen kommen Fachleute überein, dass es kontinuierliche zielgruppengerechte Kommunikations- und Bildungsmaßnahmen mit Lösungsansätzen braucht, um ein gemeinsames verantwortungsvolles Handeln herbeizuführen. Dazu gehört eine Orientierung auf dem Weg in die Zukunft ebenso wie eine ehrliche Auseinandersetzung um Sorgen, über Lebensstile und Werte. Gemeinsame Zukunftsbilder sind wichtig, damit Klimaschutz Realität wird.

More education for better climate protection ? - »*All we need is the will to change…« were the words of Rajendra Kumar Payuri, the former chairman of the IPCC, at the presentation of the report 2014. Although awareness of environmental and climate issues in the last 30 years increased, it has been found that awareness alone is not enough to get people to act and initiate change processes. In the meantime, experts agree that in addition to innovative political actions, it requires continuous target-oriented communication and education measures, which include solutions, to come up with responsible behaviour of the society. This includes orientation for the futures as well as honest discussion about worries, life and values. Common visions for the future are important to realize climate protection.*

Geteilte Meinung

Der SUV vor dem Bioladen ist (fast) nicht mehr ungewöhnlich, aber eine Schulklasse, die am Freitag in Frankfurt auf der Strasse für den Klimaschutz demonstriert und schließlich die Klassenfahrt mit dem Kreuzfahrtschiff antritt (Lorenz 2019), lässt die Republik dann doch aufhorchen. Wenn es um den Klimawandel geht, sind Diskrepanzen zwischen Reden und Handeln an der Tagesordnung. Die klassische Bildungsarbeit im Bereich der Klimaforschung scheint an ihre Grenzen gestoßen zu sein. Warum das so ist und was verändert werden muss, beschäftigt seit neuester Zeit Experten aus der Klimaforschung ebenso wie aus den Disziplinen Psychologie, Soziologie, Verhaltensforschung und Medienwissenschaft am Beispiel von Europa, einem Kontinent, der nur 10% der Weltbevölkerung ausmacht (vgl. Kap. 5.6 Lozán et al. - in diesem Band). Solange alles irgendwie funktioniert, scheint kein Handlungsbedarf zu bestehen. Aber die Transformation wird kommen. Am Ende wird es eine sein, die niemand mehr im Sinne aller Beteiligten gestalten kann. Es wird die Transformation sein, die der Klimawandel uns aufzwingen wird – mit vielfältigen und zum Teil noch unbekannten Konsequenzen. Aufklärungsversuche scheinen zu scheitern. Hat die Klimabildung flächendeckend versagt? Zu stark sind die Beharrungskräfte, es sich im provinziellen Eckchen auf kurze Sicht gemütlich zu machen, anstatt Taten zu zeigen und die Haltung verantwortungsvoller Weltbürger einzunehmen. Das wirft eine Frage auf: Welche Bildung braucht der Klimaschutz?

Wissen + Kommunikation = Bildung?

Wissen

Das Klima hat sich seit Ende des 19. Jahrhunderts deutlich erwärmt. Das betrifft die Erwärmung der Atmosphäre und des Ozeans, es gilt für den Rückgang von Schnee und Eis und auch für den Anstieg des Meeresspiegels – alles Phänomene, die so in den letzten Jahrhunderten nicht auftraten. Langjährige Datenreihen zeigen, dass extreme Wetter- und Klimaereignisse intensiver werden und häufiger auftreten. Einige dieser Ereignisse wurden mit der Einflussnahme der Menschen in Verbindung gebracht. Dazu zählen der Rückgang kalter Temperaturextreme, der Anstieg warmer Temperaturextreme, der Anstieg des Meeresspiegels und die Zunahme von Starkregenereignissen in verschiedenen Regionen (IPCC 2014). Am Einfluss der Menschen auf das Klimasystem besteht kein Zweifel, und dieser ist weitreichend. Zu einem großen Teil ist die globale Erwärmung auf die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas zurückzuführen, hinzu kommt außerdem die Abholzung von Wäldern, die Intensivierung von Viehzucht und Ackerbau.

Das heißt: Die Nutzung der fossilen Energieträger muss begrenzt werden, doch die internationale Politik zeigt Tatenlosigkeit – allen Zustimmungen zum Zwei-Grad-Ziel und allem wissenschaftlichem Konsens zum Trotz.

Und obwohl die katastrophalen Folgen eines ungebremsten Klimawandels unumstritten sind, hat das Wissen über den Klimawandel nur wenig Einfluss auf das praktische Handeln der Menschen.

Es scheint schwierig zu sein, die existentielle Bedrohung in praktisches Handeln umzusetzen. Die Ignoranz wirft eine Reihe von Fragen zu bisherigen

Bildungs- und Kommunikationsansätzen auf. Diese haben nämlich nicht dazu beigetragen, durch kritische Selbstreflexion einen Lernprozess anzustoßen, der das Denken verändert und erweitert, um umweltverträgliche Konzepte im Sinne der »großen Transformation« zu entwickeln und umzusetzen (WBGU 2011).

Kommunikation

Bei vielen Akteuren besteht die Ansicht, dass der Mangel an öffentlicher Besorgnis und umfassendem gesellschaftlichen Handeln zum Klimaschutz oder Anpassung an den Klimawandel aus Mangel an Informationen und Wissen zum Klimawandel resultiert. Das führt zu der Erwartung, dass mehr Informations- und Wissensvermittlung zum Klimawandel Menschen zum Handeln bewegen könnte.

Empirische Studien haben aber gezeigt, dass es nur geringe Zusammenhänge zwischen Klimawissen und Klimahandeln gibt. Kahan et al. (2012) konnten aufzeigen, das nicht allein das Klimawissen entscheidend ist, sondern die Wertevorstellungen einen hohen Einfluss haben, ob schließlich ein Klimahandeln motiviert wird. Zudem haben Spence et al. (2012) festgestellt, dass auch die räumliche und zeitliche Skala eine große Bedeutung einnimmt, d.h. ob die Information beim Empfänger eine persönliche Betroffenheit auslöst. Diese wird durch regionale und lokale Informationen erhöht. Eine persönliche Risikowahrnehmung hat in der Regel einen höheren Einfluss auf das Klimahandeln. Furchtapelle bleiben häufig wirkungslos.

Kommunikation, die Handlungsoptionen aufzeigt, gilt als wertvoll. Ein besonders geeignetes Mittel, um die Wirksamkeitsüberzeugung zu erhöhen, ist das Kommunizieren über »Promissing Practice«-Beispiele. Darüber hinaus sollten verstärkt Gruppen und weniger Individuen adressiert werden. Gefragt ist somit eine zielgruppenspezifische Kommunikation (Grothmann 2018), die vor allem auch die jungen Menschen einschließt, die nach Einschätzung von Gellrich (2018) eine homogenere Gruppe hinsichtlich des sozialen Milieus im Vergleich zu den Erwachsenen darstellen und somit einfacher als Gruppe erreicht werden können.

Bildung

Der Begriff Bildung ist vieldeutig. Er umfasst den Prozess der Ausbildung, die Persönlichkeitsbildung oder auch das Resultat des (Bildungs-) Prozesses.

Bildung als Prozess transportiert Wissen, das die Grundlage für einen geistigen Fortschritt im Sinne einer Vergrößerung der ursprünglichen Wissensbasis bildet. Es ist dabei unerheblich, auf welchem Weg die entsprechenden Wissensinhalte innerhalb des Bildungsprozesses vermittelt werden, ob die Weitergabe in mündlicher Form, über Publikationen, Spiele, Filme oder das Internet erfolgt.

Mit dem Transport des Lernstoffes ist es gemäß Wilhelm von Humboldt nicht getan. Bildung braucht Anwendung und die ergibt sich aus der „Verknüpfung von Ich und Welt“. Diese Fähigkeit ist dem Menschen von Natur aus gegeben und zeigt sich als geistiges und emotionales Denken und Lernen (Lauer 2017).

Umweltbildung und Bildung für nachhaltige Entwicklung

Wieviel Wissen es inzwischen zum Thema Klima und Klimaschutz gibt, zeigt die explosionsartig angewachsene wissenschaftliche Literatur. Dieses Wissen wurde durch engagierte und kommunikationsstarke Wissenschaftler in die Öffentlichkeit transportiert. Es wurde von Journalisten für die unterschiedlichsten medialen Multiplikatoren aufbereitet und von Pädagogen didaktisch für die Bildungsarbeit weiterentwickelt. Daraus resultierten unzählige informative und anschaulich gestaltete Informationsbroschüren, Unterrichtsmaterialien und Programme, die auf Bundes- und Länderebene in Schulen eingesetzt werden. In Hinblick auf das Klimathema hat gemäß der Humboldt‘schen Bildungsauffassung wenig geistige Interaktion mit der Umgebung und somit kein ausreichender Bildungsprozess stattgefunden. Zum besseren Verständnis folgt ein historischer Überblick.

Mit dem Erwachen des Umweltbewusstseins in den 1960er Jahren bekam die Idee vom Klimawandel eine neue Bedeutung. In den Vereinten Staaten veröffentlichte 1965 das President’s Scientific Advisory Committee einen Bericht zur Wiederherstellung der Umweltqualität, der einen eigenen Abschnitt zu Klimawandel enthielt.

Als eigenständiger Bereich kristallisierte sich die Umweltbildung Anfang der 1970er-Jahre heraus, als der Diskurs über globale Umweltveränderungen und deren Folgen einsetzte. 1971 erschien im Auftrag der Schwedischen Akademie der Wissenschaften eine internationale Studie zum Einfluss des Menschen auf das Klima. Die erste Konferenz der Vereinten Nationen über die Umwelt in Stockholm 1972, rückte den anthropogenen Einfluss auf Umwelt und Klima in ein breites öffentliches Interesse. Eine Schlüsselpublikation war die vom Club of Rome initiierte Veröffentlichung der »Grenzen des Wachstums« (Meadows et al. 1972), die zusammen mit der weltweiten Ölkrise 1973 die Angst der Menschen stärkte. Erstmals wurde ein Diskurs über die Beschränktheit der natürlichen Ressourcen und die Notwendigkeit eines veränderten Denkens und Handelns angestoßen. Es wurden nationale und internatio-

nale Programme verabschiedet, die darauf abzielten ein Umweltbewusstsein zu fördern und die Entwicklung neuer Verhaltensmuster zu unterstützen (Bundesregierung 1972, UNESCO 1979, Kultusministerkonferenz 1980). In dieser Phase entstanden zwei pädagogische Ansätze: Environmental Education und Innovatives Lernen. Letzteres zielte auf komplexe Problemlösungen und kreatives Denken ab.

In den 1980er Jahren wurde die Umweltbildung in Institutionen verankert, und es bildeten sich unterschiedliche Phänomene heraus, die vom »Reparaturbetrieb«, über die gesellschaftliche Veränderung (in Anlehnung an die Friedensbewegung) bis hin zur bloßen Naturerfahrung reichte. Die fünf wärmsten Jahre, die bis dahin aufgezeichnet worden waren, waren in den 1980er Jahren.

Eine deutliche Veränderung ergab sich schließlich in den 1990er Jahren aus der Konferenz der Vereinten Nationen 1992 in Rio, auf der ein Rahmenprogramm für das Leben im 21. Jahrhundert (Agenda 21) verabschiedet wurde. Das Konzept beinhaltete Kommunikation und Bildung für nachhaltige Entwicklung bzw. zukunftsfähige Entwicklung. Dabei ging es einmal um die intergenerative Gerechtigkeit (Meadows et al. 1992, Bundestag 1994, von Weizäcker et al. 1995, BUND & Misereor 1996, WBGU 1996) und eine globale Gerechtigkeit. Die Bildung für nachhaltige Entwicklung setzte auf eine Vernetzung von Ökologie, Ökonomie sowie Soziales und auf Gestaltungskompetenz. Auf eine Stärkung der wissenschaftlichen Ökologie im Fächerkanon der Universitäten hat sich dies kaum ausgewirkt.

2007 löste der vierte Klimabericht des IPCC (2007) das Klimathema wieder stark in den gesellschaftlichen Fokus. Das führte auf nationaler und internationaler Ebene zu mehr Bildungsarbeit in Schulen, v.a. mit einem kompetenzorientierten Lernansatz.



Abb. 6.15-1: *Sustainable Development Goals oder BiWiNa »SDGs-to-go«. Foto: Ignacio Campino.*

Am 1. Januar 2016 traten mit einer Laufzeit von 15 Jahren die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs, *Abb. 6.15-1*) in Kraft, die auf eine Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, sozialer sowie ökologischer Ebene dienen. »*Bis 2030 sicherstellen, dass alle Lernenden die notwendigen Kenntnisse und Qualifikationen zur Förderung nachhaltiger Entwicklung erwerben, unter anderem durch Bildung für nachhaltige Entwicklung und nachhaltige Lebensweisen, Menschenrechte, Geschlechtergleichstellung, eine Kultur des Friedens und der Gewaltlosigkeit, Weltbürgerschaft und die Wertschätzung kultureller Vielfalt und des Beitrags der Kultur zu nachhaltigen Entwicklung*« (Unterziel 4.7 der SDGs, United Nations 2015). Gemäß der Agenda 2030 sollen Lernende befähigt werden sich selbst und die Gesellschaft, in der sie leben, zu transformieren (United Nations 2015).

Mit der Betonung der Bildung in der Agenda 2030 und dem am 12. Dezember 2015 abgeschlossenen Pariser Klimaabkommen wurde eine neue Messlatte der Bildung für Nachhaltige Entwicklung gesetzt: Die Transformation wurde zum Kernziel der Bildungsarbeit.

Schließlich rückte Greta Thunberg, eine schwedische Klimaaktivistin, über Schulstreiks am Freitag, Fridays for Future (FFF), das Klimathema in den gesellschaftlichen Diskurs. Am 20. September 2019, am Tag der Verabschiedung des Klimapaketes in Deutschland, gab es in Deutschland generationenübergreifende Demonstrationen. Es war, kurz vor dem UN *Climate Action Summit* in New York, weltweit der dritte globale Klimastreik, mit dem Ziel an die Einhaltung des Pariser Klimaabkommens zu erinnern. Die Sichtbarkeit der Fridays for Future – Initiative ist aber nicht nur der Beharrlichkeit von Greta Thunberg geschuldet, sondern auch der Möglichkeit über Social Media und Messenger-Dienste Menschen weltweit kurzfristig zu erreichen und zu aktivieren. Auch wenn der Thunberg-Hype umstritten ist, so löst dieser immerhin einen generationenübergreifenden gesellschaftlichen Diskurs aus (Vohwinkel 2019).

Kriegen wir die Kurve?

Die Umsetzung verläuft träge, obwohl soziale und ökologische Grenzverletzungen eines nie gekannten Ausmaßes sich häufen. Nicht erst seit gestern weisen Experten darauf hin, dass die bisher praktizierte (Umwelt-)Bildung, auf das Wissen und Bewerten abzielt, die Aspekte des Handelns aber vernachlässigt (Kuckartz 2008).

Gute Bildung geht über reines Faktenwissen hinaus. Sie vermittelt ganzheitliche Kenntnisse, Fähigkeiten und Werte und ermöglicht vorausschauendes Denken, autonomes Handeln und Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen. Ein auf Europa gerichteter Denkansatz, der vermessen wirkt, im Gegensatz zu Ländern, deren Analphabetentum weit über dem Durchschnitt liegt und die den Großteil der Weltbevölkerung stellen (vgl. Kap. 5.6 Lozán et al. - in diesem Band). Die Klimaproblematik zeigt, dass der Bildung für nachhaltige Entwicklung die Verwendung partizipativer Methoden fehlt und kritisches Denken und Teamfähigkeit nicht befördert werden. Es mangelt – im Zeitalter der Globalisierung! –, an einem internationalen Blick, der Staatsbürger befähigt, als Weltbürger zu handeln, um Denken und Tun nicht an der eigenen Landesgrenze zu beenden.

Hätte das alles die (Klima-)bildung leisten müssen oder macht sich hier ein gesellschaftliches Defizit bemerkbar? Werner Kaube (2017) beschreibt es so: »Für viele Deutsche ist es wichtig, zu funktionieren und nicht zu partizipieren«, weil ökonomische Werte das Leben bestimmen. Diese Aussage gilt (leider) über Deutschland hinaus. Es gibt viel zu wenige Menschen, die sich einbringen und die geistige Auseinandersetzung mit den Ursachen und mögliche Lösungen suchen, aber das reicht nicht aus.

Vor allem die Entscheider aus Politik und Wirtschaft nahmen lange Zeit am Diskurs nicht teil. Und wenn sich die Träger politischer Ämter doch einbrachten, dann häufig mit Aussagen, die Balsam für die Seele der Allgemeinheit darstellen, die Beruhigung in schwierigen Zeiten sucht. So kritisierte Vizekanzler Sigmar Gabriel, der 2005-2009 Bundesminister für Natur, Umweltschutz und Reaktorsicherheit war, im Januar 2018 auf dem Parteitag der SPD seine eigene Partei mit den Worten »Umwelt- und Klimapolitik waren uns manchmal wichtiger als der Erhalt von Industriearbeitsplätzen« (Ulrich 2017). Oder Julia Klöckner (CDU), seit 2018 Bundesministerin für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, meinte im April 2018 zum Insektensterben »..man soll die Situation auch nicht überdramatisieren« (May 2018). Beide Politiker schafften mit ihren Positionierungen eine Emotionalität, allerdings »in die falsche Richtung«.

Die Tatsache, dass große Gruppen für das Klimathema immer wieder auf die Straße gingen und sich vernetzten, zeigte jedoch der Politik, dass der Klimaschutz ein gesellschaftlich breites Thema geworden ist. Mit der Europawahl wurde sichtbar, dass das Thema für eine große Zahl an Menschen sogar wahlentscheidend geworden ist – das hat eine neue Qualität.

Ebenso bemerkenswert ist auch die Tatsache, dass die als sehr konservativ geltende katholische Kirche sich mit der »LAUDATO SI« einmischte (Papst Franziskus 2015).

Was kann die Bildung noch beitragen?

Es hilft also nicht die pauschale Forderung nach mehr Geld für Bildung, wenn ein gesellschaftliches Problem auftaucht. Vielmehr brauchen wir, in Anlehnung an den Humboldt'schen Ansatz, ein verändertes Handeln. Denn gute Bildung muss sich an den Ergebnissen messen lassen.

Kinder- und Jugendbildung

Zu den generellen Problemen der Umweltthematik in der Schule gehört die geringe Quantität der Thematiken (vgl. de Haan 1999) und die Tatsache, dass die Themen vor allem aus naturwissenschaftlicher Sicht beleuchtet werden und häufig nur in Form von Projekttagen, dann aber immerhin mit situations- und handlungsorientierten Unterricht gegenüber traditionellen Formen, durchgeführt werden. Als vielversprechend wird das Einbeziehen außerschulischer Lernorte gesehen, es braucht aber flexiblere Schulstrukturen und mehr Ressourcen (Zeit, Geld und Wissen der Lehrenden). Koch & Laufer (beide UfU e.V. in Berlin, mündliche Mitteilung) zeigten auf, dass es den Umweltthemen zudem an Kontinuität fehlt und die Forderung »Vom Projekt zur Struktur« nicht realisierbar ist.

Maßgeschneiderte Aus-, Fort und Weiterbildungsmaßnahmen

Die Erwachsenenbildung, vor allem getragen durch Volkshochschulen und Kirchen, realisiert über Expertenvorträge, boomte in den 1980er Jahren, nahm in den 1990er Jahren ab und gewann mit dem IPCC – Bericht im Jahr 2007 wieder an Bedeutung. Als wichtig erachtet, aber in der Praxis nicht realisiert, ist der Bereich der Aus-, Fort- und Weiterbildung (Kaiser & Brode 1995, Rebmann 2006). Umweltbildung wird nur dort durchgeführt, wo Umweltschutzaufgaben anstehen, beispielsweise im Bereich der Abfallbeseitigung oder Gewässerreinhaltung (Weiss 1998). Zeuner (2008) spricht von der Notwendigkeit klimarelevante Berufe zu identifizieren. Klimarelevant ist aus meiner Sicht das Tun jedes Berufstätigen, daher ein durchaus relevanter Ansatz. Klar ist, dass die Schnittstelle zwischen Theorie und Arbeits(alltags)praxis bislang kaum genutzt wird und gerade die Personen, die im Berufsleben stehen, nicht erreicht werden.

Der Weg in die bessere Moderne

Fachspezialisten und eine verlässliche Wissenschaft

Für das Gelingen der großen Transformation braucht es weiterhin kluge und engagierte Wissenschaftler in der Klimaforschung, die ihre Disziplin und auch das

inter- und transdisziplinäre Arbeiten beherrschen und Fakten verstehen, aber auch Unsicherheiten glaubhaft zu kommunizieren. Auch bei zunehmendem zeitlichem und existentiellem Druck in der Wissenschaft müssen die Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis eingehalten bleiben (Zimmermann-Timm & Weigand 2016). Wissenschaft soll sichtbar, korrekt und neutral sein. Im Sinne der Sache muss die Wissenschaft unangreifbar bleiben, um Negativschlagzeilen, wie die zum 4. Sachstandsbericht des IPCC, auszuschließen (Edenhofer & Jakob 2018).

Rolle der Medien im Kommunikationsprozess

Fischhoff (1987) hat mit seiner Aussage »*One should no more release untested communications than untested pharmaceuticals*« sehr anschaulich agiert. Medien können unterschiedlich auf ihre Zielgruppe wirken und schlimmstenfalls dazu beitragen, dass wissenschaftliche und öffentliche Debatten auseinanderdriften. Qualität wie Quantität der Berichterstattung und Bebilderung spielt dabei eine Rolle. Klimakommunikation sucht nach Wirkung, die sich in entsprechenden gesellschaftlichem Handeln und dem transformativen Gestalten einer Klimakultur niederschlägt. Dafür braucht es aber nicht nur Information, sondern es braucht Erzählungen über die möglichen Zukünfte. Narrationen haben immer die Faktoren Empathie, Werte, Hoffnung und Verantwortung in ihrer Erzählstruktur. Schellnhuber hat mit seinem Vortrag »Ein neues Narrativ der Moderne« einen Vortrag in Wien gehalten, der viele berührte. Ein Weg könnte auch sein, weg von den negativen Folgen zu den normativen Forderungen, die sich beispielsweise an den planetarischen Leitplanken von Rockström et al. (2009) orientieren und statt der „Ich zuerst-Perspektive“ eine »Wir schaffen das Kommunikation« zu schaffen.

Zudem wird Wissen über die Auswahl von Bildern (z.B. *www.climatevisuals.org*) und den Umgang mit schwierigen Kommunikationspartnern geteilt, was auch den Umgang mit konplizierten Gesprächspartnern erleichtern könnte.

Gesellschaftliche Kontexte

Der Klimawandel bringt zwangsläufig auch die Welt des Menschen ins Spiel, seine Nationalität, seine kulturelle Gesinnung, seine sozialen Verhältnisse und auch seinen Lebensstil (Hulme 2014, 2018). Damit ist das Klima ein politisches Thema, das ohne den Mensch nicht erarbeitet werden kann. Es ist auch kein singuläres Problem, das es für sich gilt zu lösen, es ist vielmehr ein Zustand, unter dem die Menschheit Entscheidungen treffen muss. Unsere Wahrnehmung vom Klimawandel als Bedrohung für die gewohnte und geschätzte Lebensweisen hängt ab von unserer Sicht auf die Natur, unsere Bewertung wissenschaftlicher Analysen, unserer Risikoeinschätzung und unserer Vorstellung, was auf dem Spiel steht und ob es ethisch, politisch oder ökonomisch zu rechtfertigen ist. Es gilt Prioritäten zu setzen, abzuwägen und Uneinigkeiten in politischen, nationalen, religiösen, intellektuellen sowie administrativen Kulturen zu überwinden und den Blick vom ICH zu einem intergenerativen und globalen Ansatz zu weiten.

Nachhaltige Entwicklung ist kein fertiges Programm, sondern ein gesellschaftlicher Lern- und Gestaltungsprozess. Das notwendige Umdenken, das Denken in globalen Wirkungszusammenhängen, das Verständnis für die komplexen Zusammenhänge muss vermittelt werden, um eine Beteiligung zu ermöglichen (*Abb. 6.15-2*).

Die Rolle der Wirtschaft

Ein sektorenübergreifender Zusammenschluss, wie beispielsweise im Rahmen der Stiftung 2°, zum Zwecke des Ideenaustauschs bei der Entwicklung innovativer Ansätze (auch mit Verwaltung und Politik) ist ebenso wünschenswert wie auch innerbetrieblicher Austausch im Sinne des Klimaschutzes.

Die Wirtschaft als Unterstützer im Schulunterricht branchenaffiner Inhalte wird dagegen eher kritisch gesehen (Engartner 2019), da damit der allgemeinbildende Charakter von Schulen verloren zu gehen droht.

Bevölkerungswachstum, Bildung, Verstädterung natürliche Ressourcen und Klimawandel

Die Weltbevölkerung nimmt zu und bis 2100 soll diese auf 10,9 Mrd. anwachsen. Auf Grund der überdurchschnittlichen Geburtenrate wird ein erheblicher Teil der Weltbevölkerung in Asien und Afrika beheimatet sein (Kap. 5.6 Lozán et al. - in diesem Band). Mit der



Abb. 6.15-2: *Wirkung und Beteiligung. Live Painting-Projekt (Heide Kolling) im Rahmen der UfU-Konferenz »Beteiligung und Wirkung« im Januar 2019.*
Foto: Heike Zimmermann-Timm.

wachsenden Weltbevölkerung und auf Grund wachsender Ansprüche steigt der Druck auf die natürlichen Ressourcen bei gleichzeitig wachsender Verschmutzung von Luft, Wasser und Boden. Die Herausforderung besteht darin den Wunsch nach Wachstum und Schutz der Umwelt zu verbinden. Die Umsetzung der globalen Agenda 2030 mit den Sustainable Development Goals sind dafür ebenso notwendig wie die Entwicklung einer kritischen Denkweise, die wiederum Bildung voraussetzt. Bis heute liegt das Analphabetentum in Afrika und Asien über dem Durschnitt, in vielen Ländern auf dem afrikanischen Kontinent sogar weit über 50%. Bildung muss hier erst einmal bei den Grundlagen ansetzen, und es gehört dazu aufzuzeigen, dass nicht allein die Höhe der Bevölkerungszahl für das Wohl entscheidend ist, sondern es ist das Thema Gesundheit zu etablieren und vor allem auch die Rolle der Frau neu aufzustellen. Der Bildungsansatz in diesen Ländern verlangt die Vereinbarung von sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Zielen und braucht einen gesamtheitlichen Ansatz, der Regierung und Religion einschließt (*Abb. 6.15-3, -4* und *-5*).

Filho (2019) beispielsweise zeigte für Nigeria im Rahmen einer Befragung den Bedarf zur Aufklärung und Sensibilisierung für den Klimawandel im städtischen und ländlichen Raum auf. Nigeria unternimmt, über den Schulunterricht und Projekte auf kommunaler Ebene, große Anstrengungen eine informierte Generation aufzubauen. Bildungsdefizite sind auch in Asien häufig der Grund für Fehlverhalten im Umweltbereich. Bemühungen dies zu ändern zeigt Indien, beispielsweise mit dem auf Veranlassung des *Ministry of Enviroment and Forests* gegründeten *Center for Environmental Education*, das seit 1984 über landesweit verteilte Büros die Umweltbildung in Schulen und Kommunen fördert.

Wirtschaftliche Interessen, verbunden mit einem Streben nach Wohlstand, gehen häufig auf Kosten der Umwelt, wie prominente Beispiele aus Südamerika (Brasilien, Chile, Kolumbien) zeigen. China, das derzeitig bevölkerungsreichste Land Asiens, hat in den 1960er Jahren seinen ökologischen Fußabdruck vergrößert, indem es eine ähnliche wirtschaftliche Entwicklung wie die westliche Welt durchlaufen hat. Hier wächst seit einigen Jahren aus den unmittelbaren Erfahrungen Bewusstsein für die Umwelt, was sich in China in strikten Restriktionen niederschlägt, die aber nicht selten durch Korruption untergraben werden.



Abb. 6.15-4: *»Smiling Face Street School«, Dhaka in Bangladesch, Juni 2017. Foto: Nazrul Islam Robu.*

Die zunehmende Verstädterung (Kap. 5.6 Lozan et al. - in diesem Band), ausgelöst durch die Hoffnung vorwiegend junger Menschen nach Bildung und Arbeit, führt gerade in Entwicklungsländern zur Ausbildung von Elendsvierteln am Rande der Stadt. Neben den sozialen und gesundheitlichen Problemen in diesen Vierteln kommt hinzu, dass die sich dort ansiedelnden Menschen über Generationen praktizierte Gewohnheiten und Erfahrungen aufgeben. Beispielsweise wurden mehr als die Hälfte der Berber sesshaft, zogen in die Städte, um am Rande des Existenzminimums, zu überleben – ihr Wissen sich an die marginalen Umweltbedingen anzupassen, geht dabei verloren, zumal es wegen des hohen Analphabetentums dieser marokkanischen Bevölkerungsgruppe auch nicht dokumentiert ist.



Abb. 6.15-3: *Gedanken zur Umwelt. Mauerkunst in Peking (China), November 2014. Foto: Heike Zimmermann-Timm.*

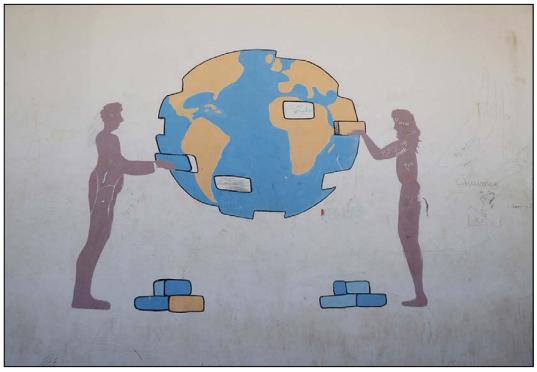


Abb. 6.15-5: *Gedanken zur Umwelt, Außenwand einer Schule in Chefchaouen (Marokko), Juni 2019. Foto: Heike Zimmermann-Timm.*

Diese Beispiele zeigen auf, dass es sowohl den globalen und regionalen Ansatz, sowie die Kombination von Tradition und Moderne braucht. Bildung ist überall Grundstein für ein positives und dynamisierendes Umfeld. Aber es braucht auch kluge Vorbilder in den entwickelten Teilen der Welt.

Ausblick

Der Anstieg der globalen Emissionskurve führt vor Augen, was die Menschen nicht wahrhaben wollen: Bisherige Bemühungen im Bereich der (Klima-)bildung haben in nicht gefruchtet. Unzweifelhaft kann man das eine oder andere verbessern, aber wenn die Diskussion nun in einer Debatte um die »richtige« Klimabildung steckenbleibt, verschließt man die Augen vor dem eigentlichen Problem. Fakt ist, dass die Gesellschaft noch nicht bereit zu sein scheint, die moralische Kraft für eine Transformation aufzubringen (SCHELLNHUBER 2015). Noch besteht die Wahl zwischen dem Gestalten der Transformation und dem Erleiden einer von der »entgleisten Natur« auferlegten Transformation.

Die Klimadebatte könnte eine Chance sein, das gesellschaftliche Engagement, das auch in anderen Bereichen vermisst wird, wieder in Gang zu bringen.

Es bleibt die Hoffnung, dass Moral und Vernunft die häufig destruktiven Kosten-Nutzen-Analysen besiegen. Es geht schließlich nicht nur um uns. Es geht vor allem um unsere Nachkommen, die uns fragen werden, warum wir nicht Einhalt geboten haben.

Danksagung

Gedankt sei Dr. habil. Ignacio Campino (BiWNa, Bonn) und Bernd Zierlein (Königstein im Taunus, Deutschland) für hilfreiche Kommentare. Dr. Huifeng Li (Köln), Nelson A. Cifuentes (Bogotá, Kolumbien), Michael Röder (Hangzhou, China), und Lotanna Ufondu (Saskatoon, Kanada) unterstützten mich mit Literatur und landeskundlichen Erfahrungen. Nazrul Islam Robu (Dhaka,Bangladesch) stellte Fotomaterial bereit.

Literatur

BUND & MISEREOR (1996): Zukunftsfähiges Deutschland. Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung. Basel, Boston, Berlin.

BUNDESTAG, ENQUETTE KOMMISSION - SCHUTZ DES MENSCHEN UND DER UMWELT (1994): Die Industriegesellschaft gestalten. Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bonn: Economica-Verlag.

DE HAAN G. (1999): Zu den Grundlagen der „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ in der Schule. Unterrichtswissenschaft 27, 3: 252-280.

EDENHOFER O. & M. JAKOB (2017): Klimapolitik. Ziele, Konflikte, Lösungen. C.H.Beck Wissen, München.

ENGARTNER T. (2019): Wie DAX-Unternehmen Schule machen. OBS-Arbeitsheft 100, Otto Brenner Stiftung.

FILHO W. L. (2019): Handbook of Climate Change Resilience. Springer Verlag.

FISCHHOFF B. (1987): Treating the public with risk communications: A public health perspective. Science, Technology & Humans Values 12, 3/4:13-19.

GELLRICH A. (2018): Das Milieu macht's! Milieuspezifische Erkenntnisse zum Klimawandel und Ansatzpunkte für zielgruppenbezogene Kommunikation. promet 101: 23-29.

GROTHMANN T. (2018): Wege für eine handlungsmotivierende Klimakommunikation – Ergebnisse psychologischer Forschung. promet 101: 15-19.

HULME M. (2014): Streitfall Klimawandel, oekom verlag. München.

HULME M. (2018): Zwischen Fakten und Bedeutung: Kulturelle Kontexte in der Klimawandelkommunikation. Promet 101: 59-65.

IPCC (2008): Climate Change 2007: Synthesis Report. IPCC-Koordinierungsstelle, Berlin.

IPCC (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). In: R. K. Pachauri & L. . Meyer (Hrsg.), IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.

KAHAN D. M., E. PETERS, M. WITTLIN, P. SLOVIC et al. (2012): The polarizing impact of science literacy and numeracy on perceived climate change risks'. Nature Climate Change 2: 732-735.

KAISER F. J. & M. BRODE (1995): Umweltbildung an kaufmännischen Schulen – Theoretische Grundlagen. Probleme und Realisierungsmöglichkeiten. Bad Heilbrunn: Klinkhardt.

KAUBE J. (2017): Deutschland, der ewige Klassenbeste.- FAZ am 19.07.2017.

KUCKARTZ U. (2008): Umweltbewusstsein und Umweltverhalten. In: Bundeszentrale für politische Bildung/bpb, Umweltpolitik, Heft 287.

LAUER G. (2017): Wilhelm von Humboldt. Schriften zur Bildung. Reclams Universalbibliothek, Nr. 19456.

LORENZ J. (2019): So verreisen Frankfurter Abiturienten.- Frankfurter Neue Presse. 18.09.2019.

MEADOWS D. L, D. H. MEDAOW & J. RANDERS (1992): Die neuen Grenzen des Wachstums. Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt.

MAY P. (2018): Wir werden dem Vorschlag zustimmen. Julia Klöckner im Gespräch mit Philip May. DLF 20. April 2018. *http://www.deutschlandfunk.de/eu-abstimmung-ueber-verbot-von-neonicotinoiden-wir-werden.694.de.html?dram:article_id=416088.*

PAPST FRANZISKUS (2015): Über die Sorge für das gemeinsame Haus. Enzyklika Laudato Si'.

REBMANN K. (2006): Berufliche Umweltbildung. In Arnold, R., Lipsmeier, A. (Hrsg): Handbuch der Berufsbildung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften: 299-312.

ROCKSTRÖM H., W. STEFFEN, K. NOONE, A. PERSSON et al. (2009): A safe operating space for humanity. Nature 461: 472-475.

SCHELLNHUBER H. J. (2015): Selbstverbrennung. Die fatale Dreiecksbeziehung zwischen Klima, Mensch und Kohlenstoff.- C. Bertelsmann Verlag, München.

SPENCE A., W. POORTINGA & N. PIDGEON (2012): The Psychological Distance of Climate Change, Risk Analysis 32, 6: 957-972.

ULRICH B. (2017): Ist dieser Mann an allem schuld? Oder doch Sigmar Gabriel? DIE ZEIT, 19. Dezember 2017. *https://www.zeit.de/2017/53/spd-sigmar-gabriel-hipster-gerechtigkeit.*

UNITED NATIONS (2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.- General Assembly A/RES/70/1: 1-35.

VOHWINKEL H. (2019): Die Greta von 1992. Welt, Politik, 24.03.2019.

VON WEIZÄCKER E. U., A. B. LOVINS & L. H. LOVINS (1995): Faktor Vier: Doppelter Wohlstand- halbierter Naturverbrauch. Der neue Bericht des Club of Rome, München.

WBGU (1996): Welt im Wandel: Herausforderung für die deutsche Wissenschaft, Berlin.

WBGU (2011): Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. WBGU, Berlin.

WEISS R. (1998): Betriebliche Umweltbildung. In: Beyersdrof, M., Michelsen, G., Siebert H. (Hrsg.): Umweltbildung. Theoretische Konzepte, empirische Erkenntnisse, praktische Erfahrungen. Neuwied: Luchterhand 185-194.

ZEUNER C. (2008): Umweltbildung = politische Bildung? Zum politischen Bildungsgehalt aktueller Konzeptionen und Ansätze. Journal für politische Bildung 4: 20-30.

ZIMMERMANN-TIMM H. & A. M. WEIGAND (2016): Ein Regelwerk allein reicht nicht aus. F&L 6: 410-411.

Kontakt:

PD Dr. Heike Zimmermann-Timm
Institut für Ökologie, Evolution und Diversität
Goethe-Universität, Frankfurt am Main
Zimmermann-timm@bio.uni-frankfurt.de

Zimmermann-Timm H. (2019): Mehr Bildung für einen besseren Klimaschutz?. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 293-299. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.43.

7 SACHREGISTER

3D-Stadtmodelle 72
Abiotische u. biotische Komponenten in d. Stadt 15
Absenkung des Bodens: 18
Adaptionsmaßnahmen 58
Adsorption der Feinstäube 213
Aerosolen, sekundäre 121
Agglomerationen, Flussdeltas 91
Ambrosia 166
Ambrosiapollen, Birkenpollen 14
Analyse des Stadtklimas 66
Anpassung an den Klimawandel 203
Anpassung in Städten 196
Anpassungserfordernis in Städten 196
Anpassungsmaßnahmen 201
Anpassung, Inzentivierung 55
Aquatische Ökosysteme 174
Artenrückgang, Landwirtschaft 172
Artenverschiebung in Städten 16
Automatisiertes Fahren 290
Autoverkehr 286
Auwaldzecke, assoziierte Bakterien 145
Auwaldzecke, Gewinner Klimaw.144

B

Baugesetzbuch 20, 213
Begrünung, Baumallee 206, 208, 213
Baumarten, empfohlene 168
Baum-Rigolen 230
Bauwerksbegrünung 197, 213-215, 218
Bebauungsplan 200
begrünte Dächer und Fassaden 229
begrünte Gleisanlagen 210
begrünte Parkierungsflächen 211
Belüftung der Innenstadt 59
Belüftung in Kategorien 49
Bevölkerung Chinas schrumpft 192
Bevölkerung in Afrika wächst rasant 192
Bevölkerung in BRD, Altergruppen 191
Bevölkerung in Europa, schrumpft 192
Bevölkerung, nach Kontinenten 192
Bevölkerung, Anteil, der 65+ 191
Bevölkerung: Sterbe-/Geburtenrate 192
Bevölkerung: Altersstruktur 190
Bevölkerungsdichte z.B. Macao 193,194
Bevölkerungspyramide in BRD 190
Bevölkerungswachstum, Bildung 297
Bildung f. mehr Klimaschutz 293
Bildung f. nachhaltige Entwickl. 294
Binnenmigration/Landflucht in BRD 195
Biodiversität 173
Bioklima 43
Blaue Infrastruktur: 197
Bodenkühlleistung 229
bodennahe Lufttemperatur, Stadt 44
bodennahe Ozon 14
Bodenrauigkeiten 12
Bodenversiegelung 12, 16
Böigkeit des Windes 36
Bolivien, Gletscher. Wassermangel 110
Bolivien, Mega-Hangrutsch 110
Bolivien, Stausee von Milluni 110
Bolivien, Wasserschutz, Hampaturi 111
Bowen-Verhältnis 24
Braune Hundezecke, weltweite Art 145
BUBBLE 34
BVOC, aus Vegetation 123, 124, 134
BVOC, Ozonkonz.-Erhöhung 124

C-D

Charakteristika des Stadtklimas 21
China, bevölkerungsreichste Land, 194
Dach- und Fasaden-Begrünung 19, 219
Dachbegrünung m. Gras u. Büschen 20
Dachbegrünung, Dachgarten 209, 215
DAS: Klimafolgenanpassungskonz. 57
Dauersmog in Indiens Neu-Delhi 14
Dermacentor reticulatus, Toleranz 144
deutsche Energiewende 258
deutsche Strategie, Klimawandelanp.224
Deutscher Städtetag 54, 58
Dobrava-Belgrad-Orthohantavirus 148
Dunstglocke, städtische 38
Durchlüftung: Region.Windsysteme 197

E

Effizienzkomponenten,Gebäudehülle 248
Einsparziele der Länder 257
El Alto 107
Emissionen von Gasen u. Prtikeln 120
Energie in Verdunstung 46
Energieeinsparmaßnahmen 54
Energiestandards und Förderung 253
Energieträger, geopolitische Aspekte 252
Energiewende 258
Entsiegelungsmaßnahmen 58
Entwässerung, Institutionen 62
erneuerbare Primärenergien 55, 252
Erwärmung, Baumaterialien 153
EU-Luftqualitätsrichtlien 242

F

Fassadenbegrünung 19, 20, 209, 215, 218
Feinstaub in der Stadt 17, 46, 128
Feinstaubkonzentration, Einfluß 123
Fernerkundung der Lufttemperatur 70
Fernerkundung der Stadtstruktur 72
Fernerkundung, Grundwassertemp. 69
Fernerkundung, Wärmeinsel 66
Fernerkundungsverfahren 62, 63
Flächenentsiegelungen 229
Flächennutzungsplan 198
Fließgewässer 177
Flora u. Fauna in Frankfurt 16, 170-171
Flüchtige organ.Verbindungen VOC 128
Flurwinde 38, 49
Flussdelta, Ganges-Brahmaputra 96
Flussdelta, New Orleans 96
Flussdelta, Nil 95
Flussdeltagebieten, Klimawandel 91
Flußdeltas, Anpassung u. Resilienz 93
Flussdeltas, Hongkong/Guangzhou 96
Flussdeltas, urbane 95
Flussdeltas, Vergleich 92
Flussdeltas: Verwundbarkeit/Risiken 92
Formelle Planungsinstrumente 198
Frischluftbahnen 49
FSME 143
Fumifugium, Schrift (1661) 29

G

Gebäude im tropischen Klima 278
Gebäude, zukunftsfähige 249
Gebäudeauflösendes Modell 65
Gebäudeenergiebedarf 255
Gebäudehülle 248
Gebäuden, Einsparziele in BRD 255
Gebäuden, Einsparziele Asia-Länder 255
Gebäuden, Förderung+ 251
Gebäuden, Lebenszyklusbetrachtung 251
Gebäuden, Nachhaltigkeit 251
Geburtenrate in Afrika 192
gefühlte Temperatur 157
Geruchsbelästigungen 37
Gestaltung in Städten 196
Gesundheit: Temp.-Ozon-Ereignisse 133
Gesundheitsrisiken, Luftverunreinigung 14
Gesundheitsrisiken, ältere Menschen 33
Gesundheitsrisiken, klima-, luftbezogen, respiratorische Erkrankungen 133
Gewässer, Auswirkungen Klima 178
Gewässer im Wandel 174, 181
Gewässer und Eutrophierung 176
Gewässerqualität 175
Gewerbeumfeldgrün 215
Gleisflächen mit vielfältiger Flora 172
Götterbaum Ailanthus altissima 162-169
Grenzwerte f. Benzol, Blei 242
Grenzwerte für Luftschadstoffe 242
Großstädte, höchstgelegene 107
Grünanteil u. Stadtklima 215
grün-blaue Infrastrukturen 19
Gründächer und Dachgärten 207, 208
Grundvoraussetzungen/Baugesetzbuch 202
Grundwasserschutz 59
Grundwassertemperaturen - Berlin 70
grüne Infrastruktur, als Kompensation zur Bebauung 19, 197, 203, 204, 266
Grünfläche, Wärmebilanz 45
Grünräume 55
Güterverkehrsleistung 56

H

Hafen der Stadt 175
Hamburger Regenmessnetz 235
Hamburger Starkregenkarte 236
Hantaviren 147
Hantaviren, Kleinsäugern assoziiert 147
Hantaviren, Grippe-ähnliche Sympto.147
Hantavirus, regionale Verbreitung 148
Hantavirus, Übertragung 149
Hantavirus-Infektionen, Endemiegeb. 148
Hantavirus-Infektionen, Geschichte 148
Hantavirus-Infektionen, korrelation 148
Hantavirus-Infektionen, Vermeidung 150
Hantavirus-Infektionen, Vorbeuge 150
Haustypen verschiedener Klimatate 275
Heiße Tage/Tropennächte, Frankfurt 114
Heiztechnik einfach & erneuerbar 248
HeRATE-Verfahren 157
hermisches Bioklima 46
Himalaya-Metropolregion 99
Hitze u. menschliche Gesundheit 113, 116
Hitze, Abschwächung d. Stadtnatur 173

Hitze, Abschattung d. Laubbaums 267
Hitze, Belastung älterer Menschen 173
Hitzeaktionsplan 117, 118
Hitzebelastung in Städten 280
Hitzeinseleffekte: Paris u. Madrid 282
Hitzeschutz 56
Hitzestress im Stadtquartier 264
Hitzestress, Formen von 264
Hitzestress, Grüne Infrastruktur 266
Hitzestress, Abschattung 265
Hitzestress, planerische Maßnahmen 263
Hitzestress, Reduzierung 263
Hitzestress, thermophysiologische Bewertungsindize 264
Hitzestress, Verdunstungsabkühlung 228
Hitzestress-Reduzierung 227
Hitzetage in europäischen Städten 281
Hitzevorsorge in urbanen Räumen 269
Hitzewarnungen/Warnsystem 152, 157
Hitzewelle 1994 154
Hitzewelle, Luftverunreinigungen 153
Hitzewelle, Temperat. Stadt-Umland 155
Hitzewellen in BRD-Großstädten 115
Hitzewellen in BRD, Häufigkeit 157
Hitzewellen 152
Hitzewellen, 1950-2015 157
Hitzewellen, ältere Menschen 154
Hitzewellen, Anpassung d. Medikation 153
Hitzewellen, Herz-Kreislauf-System 153
Hitzewellen, Definitionen 114
Hitzewellen, Gesundheitsschäden 153
Hitzewellen, größte in Deutschland 156
Hitzewellen, Morbidität/Mortalität 152,154
Hitzewellen, hohe Sterbedaten 152
Hitzewellen, Belastbarkeit 153
Hitzewellen, Reaktionen d. Körpers 152
Hitzewellen, Risiko Vorerkrankungen 153
Hitzewellen, Risiko f. Stadtbewohner 153
Hitzewellen, Risikofaktoren 153
Hitzewellen, Schweißproduktion 152
Hoch- und Grundwasserschutz 59
Hochgebirge im Klimawandel 111
Hochwasser in Städten 18
Hochwasser, Meeresspiegelsanstieg 18
Hochwasser, Erderwärmung 18
HUSCO Messnetz 62, 63

I

INDC für China 258
INDC für den Iran 258
INDC für Kambodscha 259
INDC für Vietnam 260
Inertialschicht 39, 40
Infektionsschutzgesetzes (IfSG) 147
Informelle Planungsinstrumente 199
INKAS 269
INKAS, eine Entscheidungshilfe 270
INKAS, Anpassungsmaßnahmen 272
INKAS, Bebauungstypen 272
INKAS, Entsiegelung-Innenhöfen 272
INKAS, Flächenanalyse 270
INKAS, gefühlte Temperatur 271
INKAS, Wirkungsanalyse 271
Insekten aus wärmeren Gebieten 172
Inseln, Risiken im Klimawandel 94
invasive gebietsfremde Pflanzen/Tiere 166
Inversionswetterlage 128

J-K

Kaltluft und Überwärmung 49
Kaltluft, Bedeutung d. 48
Kaltluftbahnen 49
Kaltluftbildung u. Tropennächte 80
Kaltluftschneisen 59
Kaltluftsimulation 278
Kanalisation, Überstau 19
Kathmandu-Nepal, Risikolebensraum 99
Kathmandu, Urbanisierungsprozess 100
Kathmandu, Bevölkerungswachstum 102
Kathmandu, Implikationen Klimawandel 105
Kathmandu, PM_{10}-Konzentrationen 102
Kathmandu, Wasserverschmutzung 103
Kathmandu, Zahl d. Fahrzeuge 102
Kathmandu-Tal, bebaute Fläche 101
Kathmandu-Tal, Stadtentwicklung 99
Klimaanpassung der Stadt Karlsruhe 200
Klimaanpassung im Baugesetzbuch 197
Klimaanpassung, Städte/Grundlagen 53,56
Klimaanpassungsfonds 58
Klimaanpassungsmaßnahmen, -strategie 20, 58, 123, 196
KLimaArtenMatrix 169
Klimaatlas 33, 53
Klimabaumsortiment 169
Klimagerechtigkeit 58
Klimagipfel Fidschi/Bonn 2017 53
Klimakonzepte in Städten 54
Klimaneutralität im Gebäudebestand 247
Klimaneutralität in der BRD 253
Klimanotstand 54
Klimaschutz in Städten 53, 196, 293
Klimaschutz, Bildung 294
Klimaschutz, Inzentivierung 55
Klimaschutz, Kommunikation 294
Klimaschutz, Kriegen wir d. Kurve? 295
Klimaschutz, Rolle der Medien 297
Klimaschutz, Rolle der Wirtschaft 297
Klimaschutz, Sustainable Develop. 295
Klimaschutz, Wirkung/Beteiligung 297
Klimaschutz, Wissen + Kommunik. 293
Klimaschutzpaket, -strategien: 55
klimatische »Oasen« 45
Klimavariablen,Feinstaubkonz. 123
Klimavariablen, Ozonkonz. 123
Klimaverträglichkeit 54
Klimawandel u. Luftqualität 122
Klimawandel und Hochgebirge 111
Komfortlüftung 249
kommunale Stadtplanung 197, 202
Kühloase« im bebauten Quartier 207
Küstendeltas, Verwundbarkeit 93
Küstengebiete und Inseln, Risiken 94
Küstenstädte im Klimawandel 82
Küstenstädte, Beispiel New York 82
Küstenstädte, Hochwasser 85
Küstenstädte, Meeresspiegelanstieg 84

L

La Paz, »Schwarze Februar 2002« 109
La Paz, Großstadt in Beckenlage 106
La Paz, Anpassung an Klimawandel 109
La Paz, Klimawandel-Auswirkungen 109
La Paz, El Alto 107
La Paz, höchstgelegene große Stadt 106
La Paz, Katastrophenschutz 109
La Paz, Luftqualität 108
La Paz, Seilbahn-Netz 108
La Paz, Smog im Talkessel 108
La Paz, Staudamm, Hampaturi 106
Landflucht in BRD, Dörfer steben aus 195
Landflucht 15, 188, 193
ländliche Biodiversität 171
Lärmbelästigung in Deutschland 241, 243
Lärm, -minderung 56, 241-244
LCZ - Local Climate Zone 71
Lebensbedingungen in der Stadt 167
Lima, Regenzeit im Hochland 183
Lkw-Verkehr 56
Local Climate Zone (LCZ) 71
Local Climate Zones Kartierung 72,276
lokale Kaltluftsysteme 197
London-Smog 29
Lorbeerkirsche, Zunahme im Städte 163
Luftchemie, Veränderung 124
Luftfeuchte 22, 45
Lufthygiene 241
Luftmessnetze 62
Luftqualität u. Stadtlärm 17, 56, 240-244
Luftqualität, Veränderungen d. Klima. 122
Luftreinhaltung 243
Luftschadstoffbelastung 46, 47, 128
Luftschadstoffe Feinstaub 14, 128
Luftschadstoffe als Gemisch 14, 134
Luftschadstoffe, Atemwegserkrank. 129
Luftschadstoffe, Aufnahme 128
Luftschadstoffe, Grenzwerte 242
Luftschadstoffe, Herz-Kreislauf-Erkrank.130
Luftschadstoffe, vulnerable Gruppen 131
Luftschadstoffe, andere Auswirkungen 131
Luftschadstoffe, Wirkungen 129
Lufttemperatur, Stadtpark Hamburg 206
Lufttemperatur u. Luftfeuchte 45
Lufttemperatur und Ozonbildung 133
Lufttemperatur, Verdunstungskühlung 231
Luftverschmutzung, Kathmandu 101
Luftverunreinigung 14, 27

M

Marcapomacocha, 183
Maßnahmen, Klimaanpassung 202
Maßnahmen, Klimafolgenkonzept 57
Maßnahmen, Hitzestress-Reduzier. 227
Maßnahmenprogramme, Anpassung 54
Megastädte 15, 188, 193
Megastädte der Welt im Jahr 2018 193
Megastädte der Welt im Jahr 2030 193
Megastädte in Küstenlage, 82
Megastädte u. Klimawandel 82
Messdichte 63
Messmethode, physikalische Prinzip. 66
Messmethoden, stadtklima.Parameter 62
Messstationen, Qualitätsprüfung 62
meteorologische Parameter in Städten 43
Millionenstädte 15
Minderung von Lärm 244
Miniaturmodell im Computer 66
Mississippi 97
Mississippi-Delta 96, 97
Mitigationsstrategien 54

MITRAS 65
Mobile Messungen 63
Modell MITRAS 65
Modellierung, numerische 63, 64
Morbidität durch Hitze 117
Morbiditäts- und Mortalitätsraten 27
Mortalität durch Hitze 116
Mortalität während Hitzewellen 116
Mortalitätsraten 27
N
nachhaltige Stadt 53
Nachhaltigkeits-/Suffizienzstrategie 59
Nachhaltigkeitsdreieck 59, 60
Neophyten in Städten 167
New York als gefährdete Megastadt 83
New York City, Hochwassergebiete 87
New York City, Meeresspiegelanstieg 85
New York City, Sommertemperaturen 88
New York City, Sterblichkeit bei 65+ 89
Niederschlagsentwässerung 234
Niederschlagsmessung/Regenindex 235
Niederschlagsversickerung 59
Niederschläge;verdunsten/versickern 237
Nil-Delta 96
NO_2-Grenzwert, Überschreitung 17
NO_x - Emissionen 121
numerische Modellierung 64, 64
Nutzerverhalten/Nutzereinflüsse 257
O
Oberflächen-/Straßenraumgestaltung 197
Oberflächentemperatur/Energiebilanz 208
Oberflächentemperaturen (Stadt Basel) 68
Oberflächentemperaturen Grüne Fläche 211
Oberflächentemperaturen, Landsat-8 68
Oberflächentemperaturen, urbane 67
Oberflächenwärmeinsel 67
Oke, T.R. 30
ökonomisch.Verluste, Naturkatastrophen 84
ökonomisches Potential: Anpassung 55
Ökosystemdienstleistungen 180
Ozon 128, 133
Ozon im Umland 134
Ozon im urbanen Raum 134
Ozon und ultrafeine Partikel 27
Ozon, bodennah 134
Ozon, Einfluß 122
Ozon, kardiolog.Gesundheitsgefährd. 134
Ozon, Mortalitätsrate 134
Ozon, Schädigung d. Lungengewebe 134
Ozon, sekundärer Luftschadstoff 134
Ozon, Stadt-Umland-Werte 135
Ozon, Trends 136
Ozon, Vorläufersubstanzen 136
Ozonbildung, räuml.Differenzierung 135
Ozonkonzentrationen, höchste 123, 135
Ozonproduktion, fotochemische 14
Ozonzyklus, photochemisch 122
P
Pariser Übereinkommen 53
Parkflächen und Pocket-Parks 205
Parkplatz beschattet 210
Partikelbelastungen 128
Passivhaus-Gebäude 250
Pearl River Delta 96
Personenverkehrsleistung 56
PET und Windgeschwindigkeit 49
Pflanzen: Schatte,Abkühlung,Filterung 173
Pflanzen, Stadt-Lebensbedingungen 167
Pflanzen, eingewanderte Arten 172
Pflanzen, tolerant., robustere Arten 168
Pflanzenreaktionen 159
physikalische Modellierung 64, 66
physiologisch äquival.Temperat.(PET) 48
PET, Klassifizierung 46, 264
Pkw, gemachte Wege 290
Planungsebenen, klimat.Fragestellung. 51
Planungshinweiskarten, VDI 51
Planungsinstrumente 53, 54, 196, 197, 198
Planzen, Funktionen für Stadtklima 169
PM-Emissionen 121
Pocket-Park 206
Pollen, Zunahme allergieauslösender 14
Pollenproduktion, intensivierte 14
Prandtl-Schicht 36, 38, 39
Puumala-Orthohantavirus, PUUV 147-148
PUUV-Erkrankungshäufungen 149
Q-R
Radwege 286
raue Unterschicht 40
Rauigkeit und Windgeschwindigkeit 48
Rauigkeitslänge, Klassifizierung d. 50
Raumordnung und Bauleitplanung 53
Reduzierung durch lufthygie.Belastung 19
Reduzierung der thermische Belastung 19
Reduzierung Hitzestress d. Grünfläche 266
Reduzierung Hitzestress, Doppelstrateg. 265
Reduzierung von lokalem Hitzestress 263
Regenwasserbewirtschaftung 59
Retentionsflächen 59
Rhein 97
Riesenbärenklau. 166
Risikominimierung 59
Rosskastanie 168
Rötelmaus 147
Rückhaltemöglichkeiten 19, 237
S
Satelliten, Analyse des Stadtklimas 66
Saurer Regen (*Acid Rain*) 31
Schadstoffdeposition 124
Schiffsemissionen in Hafenstädten 120
Schilfs *Phragmites australis* in Nordamerika als invasiver Neophyt 163
Schilfs Phragmites australis 163
Schwammstadt 238
Schwammstadtprinzip 228, 229
Schwebstoffen, natürliche 14
Schwefeldioxid-Emissionen 128
Simulation des Abflussgeschehens 236
SOA (*Secondary Organic Aerosol*) 27
Sommertage u. heiße Tage in Städte 78
Sozioökonom.Entwicklung, Asia-Länder 256
sponge-city 238
Sportfläche z. Überflutungsvorsorge 238
Stadt, kurze Wege 56
Stadt- Umland- Differenzierung 134
Stadtatmosphäre, vertikale Schichten 36, 41
Stadtbäume der Zukunft 168
Stadtbäumen, städtische Luftqualität 125
Stadtbevölkerung 15
Städte an d. Grenze d. Bewohnbarkeit 13
Städte im Klimawandel 11, 26
Städte in Flussdeltagebieten 91
Städte u. Naturkatastrophen 84
Städte u. Kommunen, Schlüsselrolle 20
Städte, Anpassung Klimawandel 221, 222
Städte, Barrieren bei d. Umsetzung von Anpassungsmaßnahme 223
Städtische Fließgewässer 176
Städte, gesundheitliche Gefährdungen 113
Städte, Hafen 176
Städte, Herausforderungen u. Politikinstrumente 221
Städte, Kanäle, Grachten und Fleete 176
Städte, Ozonkonzentration 122
Städte, Steh- und Fließgewässer 179
Städte, Stehgewässer 175
Städte, Unterstützung übergeordneter Ebenen an Kommunen 224
Städte, viele Kommunen noch ohne Klimawandelanpassungsprogramm 223
Städte: Luftqualität 120
Städtebauliche und planerische
Stadtentwicklung 58
Stadtentwicklung, klimagerechte 58
Stadtentwicklung, nachhaltige 60
Stadtentwicklungsplanung 54
Stadtentwicklungspolitik 58
Stadtfläche 15
Stadtgewässer verschiedene Systeme 174
Stadtgewässer 174
Stadtgewässer, geringere Wassermenge 79
Stadtgewässer, hohe Temperaturen 179
Stadtgewässer, Lebensraum verbessern 181
Stadtgewässer, Sauerstoffkonzentration 179
Stadtgewässer, soziale Dienstleistungen 180
Stadtgewässer, trockengefallen 180
Stadtgrün (2021) 168
Stadtgrün und Stadtblau 116, 124
Stadthindernisschicht 40
städtische Fauna 171
städtische Flora 170
städtische Grenzschicht (Graphik) 38
städtische Grenzschicht 36, 37
städtische Grenzschicht, Ausprägung 38
städtische Grenzschicht, Dynamik 38
städtische Grünfläche 16
städtische Grünflächen 45
städtische Hitzeinseln 229
städtische Ökosysteme 15
städtische Ökosysteme 159
städtische Überwärmung 25
städtische Waldgebiete 204
städtische Wärmeinsel 25, 31, 32, 48,160
städtische Wärmeinseleffekt 11
städtische Wasserfläche 46
städtischer Wärmeinseleffekt, Schema 11
Stadtklima 21, 40
Stadtklima - deutsche Städte 74
Stadtklima Mainz 76
Stadtklima u Luftqualität 108
Stadtklima Wiesbaden 76
Stadtklima, Wassersektor Perus 183
Stadtklima, Urbanisier. u. Klimawandel 165
Stadtklima, KlimaArtenMatrix 162
Stadtklima, Luftqualität/Hochgebirgen 108
Stadtklima, Modifizierung 43

Stadtklima, neophyti. C4-Pflanzen 162
Stadtklima, Reaktionen d. Pflanzen 161
Stadtklima, Schutz von Altbäumen 162
Stadtklima, Stadtbäume unter Stress 162
Stadtklima, städtische Pflanzenareale 162
Stadtklima, Umweltbeding. f. Pflanzen 160
Stadtklima, Verhalten der Flora 164
Stadtklima, Flora-Verhalten,Evolution 164
Stadtklima, Verhalten einzelner Pflanze 161
Stadtklima, verläng.Vegetationsperiode 163
Stadtklima, wärmelieb. Gefäßpflanzen 162
Stadtklima, widerstandsfähige Bäume 162
Stadtklima, Temperaturen+Trockenheit 165
Stadtklima: numerische Modellen 44
Stadtklima: Untersuchungsmethoden 62
Stadtklima«-Typus 21
Stadtklimaforschung im 20./21. Jh 34
Stadtklimaprojekt KLIMPRAX 76
Stadtklimaprojekt Stuttgart 74
Stadtklimaten 21
Stadtklimatologie 21
Stadtklimatologie, Anfänge 28
Stadtklimatologie, Geschichte 28
Stadtklimatologie, im Mittelalter 28
stadtklimatologische Studien 66
Stadtkllima, Differenzierung d. 43
Stadtplanung 58
Stadtsanierung und Stadtumbau 202
Stadtstruktur und Klimawandel: 280
Stadtstruktur, Bau im tropischen Klima 278
Stadtstrukturen und Stadtklima 276
Stadtstrukturen und Stadtklimatope 277
Stadtstrukturen und Stadtklimatope 277
Stadtstrukturen, verschiede Klimazonen 275
Stadtteil, Hafencity 175
Stadt-Überwärmung, Reduzierung 58
Starkniederschläge 18
Starkregen in Deutschland 19
Starkregen, Kanalentlastung 238
Starkregenindex z. Risikokommunikation 236
Starkregenrisikomanagement 238
Statistische Modelle 63
Stehgewässer 176
Sterblichkeit durch Hitzewelle 12
Stickoxid-/Feinstaubemission Hamburg 121
Strahlung, Differenzierung d. 44
Strahlungs- und Wärmebilanz 133
Strahlungsbilanz 22
Strahlungsbilanz: Stadt und Umland 23
Strahlungsflüsse 43
Straßenbäume und Baum-Rigolen 230
Straßenschluchten 40
Straßenverkehr, Ursache f. Lärm 242
Straßenverkehr, Hauptursache f. Luftv. 242
Sturmfluten und Hochwasser 85
Sturmfluthöhe, Hurrikan Sandy 86

T

Tagesmittelwerte 26
Temperatur in großen Städten 13
Temperaturen, momentane Aufnahme 44
Temperaturentwicklung großer Städte 12
Temperatur-Ozon-Ereignisse 133
Temperatur zwischen Stadt u. Umland 11
Temperaturverlauf in beschatteten Straße 207
Temperaturverlauf b. einer Hitzewelle 204
thermische Belastung (PET) 48
thermische Belastung, räumig.Differenz. 46
thermische Turbulenz 37
thermischer Komfort 46
TIR-Fernerkundungssysteme 67
Todesfälle u. Verluste, Naturkatastrophen 84
Topographiewert 26
Treibhausgasen bis 2050 60
Tropennächte, Mainz u. Wiesbaden 79
Turbulenz 36

U

Überflurwärmeinsel 25
Überfluteter Stadtteil in Lagos 18
Überflutung, gefährd. Gebiete Hamburg 237
Überflutungsflächen 55
Überflutungsschutz 59
UHI-Effekt deutscher Städte 154
ultrafeine Partikel 27, 128
Umgang mit viel Regenwasser 233
Umgang mit Niederschlagswasser 237
Umweltbildung 294
Umweltmeteorologie 48
Unterflurwärmeinsel 68
Urban Heat Island (*UHI*) 25, 31, 153
urban plume 38
Urban Structure Types 276
urbane Bausubstanz 22
urbane Bevölkerungsentwicklung 284
urbane Energiebilanz 22
urbane Flussdelta (Ganges-Brahmaputra) 95
urbane Flussdelta, Pearl River 95
urbane Flussdelta, Nil 95
urbane Gewässer 174
urbane Gewässer, Charakteristika 175
urbane Gewässer, Geschichte 174
urbane Grundwassertemperaturen 68
urbane Hitze 113
urbane Human-Biometeorologie 264
urbane Oberfläche 22
urbane Struktur und Emissionen 282
urbane Struktur und Hitzeinseln 281
urbane TIR-Fernerkundung 68
urbane Transformationen 280
urbane u. rurale Pflanzen: Differenzen 164
urbane Vegetation 124
urbanes Leben im Jahr 2050 285
Urbanisierung in Flussdeltas 92
Urbanisierung in Himalaya 99
Urbanisierungsgrad 26

V

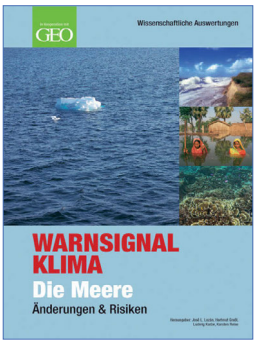
VDI, Richtlininie Vereins Deutscher Ing. 34
Vegetationsperiode, längere 16
Ventilation, Bedeutung 48
Ventilation, Behinderung 124
Ventilationsbahnen oder Luftleitbahnen 49
Verbesserung der Luftqualität 244
Verbesserungen zur gefühlt.Temperatur 20
Verdunstung von Regenwasser 210
Verdunstungsabkühlung 227
Verkehr in der Stadt 16
Verkehrsleistung in Deutschland 56
Verkehrsmittel, Flächeninanspruchnahm. 287
Verkehrswende in den Städten 17, 286
Verkehrswende, neue Verkehrskultur 291
Verkehrswende, Rahmenbedingungen 289
Verkehrswende, städtische 288
Vermeidungs- u. Anpassungsstrategien 54
Vermessung mit Laserstrahlen (LIDAR) Flugzeugen/Hubschraubern 72
Verringerung der Aufheizung im Gleis 210
Versiegelung, Versiegelung 153
Versiegelung, Wasserhaushalt 153
Versiegelungsgrad in Deutschen Städten 19
Verstädterung im globalen Süden 256
Verstädterung 297
Verteilung der therm.Belastungswerte PET 279
VOC-Emissionen 122, 134
VOC-limitiertes Regime 134

W-Y-Z

Wachstumsrate der Weltbevölkerung 191
Wärme in der Stadt 113
Wärmebelastung Stuttgart 76
Wärmebelastung, Grenze bei 32°C 157
Wärmebilanz: Stadt und Umland 23
Wärmedämmmaßnahmen 56
Wärmeinsel 31, 48
Wärmeinsel, Stadthindernisschicht 70
Wärmeinsel in den Abendstunden 133
Wärmeinsel in Oberhausen 26
Wärmeinsel, Einfluß auf Pflanzen 164
Wärmeinsel, oberirdische (*UHI*) 25
Wärmeinsel, Unterflur 68
Wärmeinsel, unterirdische (*SUHI*) 25
Wärmeinselbildung, Schutzmaßnahmen 59
Wärmeinseleffekt 11
Wärmeinseln 167
Wärmeinselzirkulation 38
wärmeliebende Arten in Städten 16, 167
Wasserfläche, Energiebilanz 46
Wasserhaushalt unterschiedlicher Landnutzungen 205
Wasserhaushalt 25
Wasserknappheit in Megastädten 182
Wasserrückhaltung im Gleis 210
Wassersituation in Lima 182
Wassersituation Limas 185
Wasserversorgung, Wasserentsalzung 186
Wasserversorgung, Wasser anderer Flusse 186
Wasserversorgung in d. Zukunft, Prognose 184
Wasserversorgung in Städten 17
Wasserversorgung, aufbereitetes Wasser 186
Wasserversorgung über Grundwasser 186
Wasserversorgung, Änderung im Abfluss 184
Wasserversorgung, Gletscher/Äquatomähe 183
Wasserversorgung, Entwicklung, Lima 184
Weltbevölkerung 188
Weltbevölkerung bis 2100 192
Weltbevölkerung nach Kontinenten 190
Weltbevölkerungsentwicklung, Pandemien 189
Windgeschwindigkeit und PET 48
Windgeschwindigkeit 22
Windgeschwindigkeitsabnahme Stadtkern 12
Wirkungen des Klimawandels 257
Wohnflächenbedarf 58
Wohnumfeldgrün und Gesundheit 213
Zecken in der Stadt 141
Zecken in Deutschland 141
Zecken, älteste bekannte Parasiten 141
Zecken, der Gemeine Holzbock 142
Zecken, verschiedene Arten 141
Zeckenarten 141
Zielkonflikte in der Stadtplanung 283









Wissenschaftler informieren direkt

Weltweit leben heute 55% der Menschen in Städten; in den 1950er Jahren waren es nur 30%. Nach Schätzung der Vereinten Nationen werden im Jahr 2050 ca. 70% der Menschen in Städten leben. In Europa waren 2011 schon über 75% Städter. Ihr Anteil wird bis 2050 voraussichtlich auf etwa 82% ansteigen. 2018 gab es weltweit 33 Megastädte, d.h. Städte mit über 10 Mio. Einwohnern, 2030 werden es wahrscheinlich bereits 43 sein.

Städte nehmen weltweit nur ca. 3% der Landoberfläche ein. Aufgrund der Konzentration von Bauwerken, Verkehr, Industrie und Energieverbrauch herrschen in Städten andere Temperatur-, Wind-, Niederschlags- und Luftfeuchtigkeitsverhältnisse als in ihrem Umland. Man spricht vom Stadtklima, das vom globalen Klimawandel verstärkt wird.

Die Lufttemperaturdifferenz zwischen der wärmeren Stadt und ihrem kühleren Umland wird städtische Wärmeinsel genannt. Sie hängt von Faktoren wie Bodenversiegelung und Bebauungsart der Stadt ab, grüne Infrastrukturen können sie dämpfen. Die Gebäude und die asphaltierten Straßen wirken wie Speicherheizungen, die nachts langsamer ihre Wärme abgeben als das Umland.

In Hamburg z.B. ist die mittlere Temperatur im Sommer tagsüber ca. 0,5°C höher als außerhalb der Stadt und nachts können die Unterschiede 2 °C und mehr betragen. Bei Hitzewellen ist der Unterschied v.a. nachts noch höher. Im Hitzesommer 2003 gab es in Europa über 70.000 zusätzliche Tote vor allem in den Städten. Hauptgrund war die geringere nächtliche Abkühlung mit einer größeren Anzahl von tropischen Nächten (Minimumtemperatur >20°C).

Nach der Weltgesundheitsorganisation ist die Luftverschmutzung in und außerhalb der Wohnung weltweit das größte Umweltrisiko für die Gesundheit. In der Außenluft spielt das Schadstoffgemisch aus Feinstaub, schädlichen Gasen und Ozon die Hauptrolle. Neben natürlichen Schwebstoffen gibt es in Städten viele zusätzliche Partikel aus Verbrennungsmotoren, Reifen-, Straßen- und Bremsabrieb, Kraftwerken, Heizungen, Öfen etc.

Das vorliegende Buch wendet sich an interessierte Laien, Lehrer, Schüler, Studenten sowie Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft. Es beleuchtet Aspekte des Stadtklimas, des Ökosystems Stadt und von Gesundheitsrisiken in Zeiten des Klimawandels, vergleicht Städte verschiedener Regionen und gibt Hinweise für Planung, Anpassung und Klimaschutz.

EAN: 978-3-9820067-2-7

9 783982 006727

Infos: Tel. 040-4304038
JL-Lozan@t-online.de

Universität Hamburg

Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Zentrum für Material- und Küstenforschung

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit