

Heft 106 (2023)

promet

meteorologische fortbildung

Stadtklima im Wandel



Impressum

Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleitung

Dipl.-Met. Magdalena Bertelmann
(Offenbach/M.)

Redaktionsausschuss

Prof. Dr. G. Adrian (Offenbach/M.)
Prof. Dr. B. Ahrens (Frankfurt/M.)
Prof. Dr. F. Ament (Hamburg)
PD Dr. F. Berger (Lindenberg)
Prof. Dr. C. Bernhofer (Dresden)
Prof. Dr. G. Craig (München)
Prof. Dr. A. Macke (Leipzig)
Prof. Dr. S. Meilinger (Sankt Augustin)
Dr. M. Olefs (Wien)
Dr. C. Plaß-Dülmer (Hohenpeißenberg)
Dr. M. Sprenger (Zürich)

Layout und Satz

Karin Borgmann Grafikdesign

Mitarbeit

Tanja Netz, Heike Beck,
Susanne Schorlemmer, Peggy Hofheinz

Titelseite

Bei der Umgestaltung von Städten nimmt die Schaffung von Grünflächen (wie hier bei einem Projekt der Frankfurt School of Finance & Management) eine wichtige Rolle ein und stellt einen Baustein zur Verbesserung des Stadtklimas dar. Foto: HKK Landschaftsarchitektur GmbH

Verlag

Deutscher Wetterdienst, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Am DFS-Campus 4, 63225 Langen, selbstverlag@dwd.de

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten. Die Online-Ausgabe steht unter der Creative Commons-Lizenz CC BY-NC-ND 3.0 DE.



Druck

Heyne-Druck GmbH, Ferdinand-Porsche-Str. 15, 63073 Offenbach/M.



Auflage: 3500

Preis des Heftes: 18,90 € plus Versandkosten

Redaktionsschluss: 30.06.2023

ISSN: 0340-4552 (print) | 2194-5950 (online)

ISBN: 978-3-88148-542-5 (print)
8148-543-2 (online)

DOI: 10.5676/DWD_pub/promet_106

<https://www.dwd.de/promet>
Alle Informationen zu *promet*
im Internet ▶



Editorial

Liebe Leserinnen und Leser,

der Start in den diesjährigen Sommer verlief wieder einmal wärmer und niederschlagsärmer als im langjährigen Klimamittel und ging vor allem für die Bewohner von Städten zeitweise mit einer starken Wärmebelastung einher: Gefühlte Temperaturen bis 36 °C, dazu eine nur geringe nächtliche Abkühlung.



Viele Menschen flüchten an solchen Tagen aus den warmen Innenräumen ans Wasser oder unter schattenspendende Bäume, wo die physiologische Äquivalenttemperatur (ein biometeorologischer Index für den thermischen Komfort des Menschen) um bis zu 15 K geringer sein kann. Und so ist es kein Wunder, dass „grün-blaue Infrastruktur“ ein wichtiges Stichwort ist, wenn es um die Anpassung von Städten an den Klimawandel geht: Nicht nur, um für die Menschen mehr kühle Oasen am Wasser oder im Grünen zu schaffen, sondern auch, um durch entsiegelte Flächen besser auf extreme Starkregeneignisse vorbereitet zu sein.

Welche Möglichkeiten gibt es neben Begrünung und mehr wasserdurchzogenen Flächen noch, um das Leben in den Städten auch in der Zukunft lebenswert zu gestalten? Durch was zeichnet sich das städtische Klima überhaupt aus? Und welche Auswirkungen haben verschiedene Energiesysteme (wie zum Beispiel Photovoltaik, Windkraft oder fossile Energien) auf das lokale Stadtklima? Diese und viele weitere bedeutsame Fragen werden in dieser Ausgabe behandelt.

Mein Dank gilt allen Beteiligten für ihr außerordentliches Engagement bei dieser Ausgabe – Prof. Groß und Prof. Kuttler für die hervorragende und immer herzliche Zusammenarbeit, Prof. Christen für die sehr wertvolle Begutachtung und natürlich allen Autorinnen und Autoren, ohne die dieses Heft erst gar nicht zustande gekommen wäre.

Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, wünsche ich eine informative Lektüre und – egal ob Sie in der Stadt oder auf dem Land wohnen – einen schönen Restsummer mit angenehmem „Klima“.

Ihre

Magdalena Bertelmann
Schriftleiterin *promet*

Inhalt

promet – Meteorologische Fortbildung, Heft 106 (2023)

Thema des Heftes: **Stadtklima im Wandel**

Fachliche Redaktion: Prof. Dr. Günter Gross, Universität Hannover und
Prof. Dr. Wilhelm Kuttler, Universität Duisburg-Essen
Fachliche Durchsicht: Prof. Dr. Andreas Christen, Universität Freiburg

Beitrag	Seite
G. GROSS, W. KUTTNER Vorwort „Zu diesem Heft“	2
W. KUTTNER, G. GROSS 1 Charakteristika des Stadtklimas	3
D. SCHERER 2 Temperatur und Hitze in der Stadt	15
T. WINTERRATH, T. JUNGHÄNEL, K. LENGFELD, E. WALAWENDER, E. WEIGL 3 Starkregenereignisse im urbanen Raum – Monitoring auf Basis von Messstationen und Wetterradar	27
K. SEDLMEIER, B. TINZ 4 Wind in der Stadt	39
S. WURZLER, H. HEBBINGHAUS, L. ROGALLA, N. BECK, A. KLOSTERKÖTHER, J. GEIGER 5 Entwicklung der Luftqualität in der Metropolregion Rhein-Ruhr	51
A. MATZARAKIS 6 Hitze in Städten – Quantifizierung, Warnsysteme und Hitzeaktionspläne zum Schutz der menschlichen Gesundheit	61
T. F. KRIESTEN, A. ZIEMANN, C. SCHÜNEMANN, V. GOLDBERG, U. MODEROW, R. ORTLEPP 7 Meteorologische Daten zur Bewertung der Wärmebelastung in Gebäuden	71
S. PAULEIT, S. ERLWEIN, S. LINKE, M. RAHMAN, T. ZÖLCH, T. RÖTZER 8 Grün-blaue Infrastruktur für die Klimawandelanpassung der Stadt	79
S. EMEIS 9 Lokalklimatische Auswirkungen der urbanen Energieversorgung	89
TH. FOKEN, E. PARLOW, G. GROSS, B. LEITL 10 Untersuchungsmethoden zum Stadtklima	97
J. BAUMÜLLER, L. KATZSCHNER 11 Stadtklima und Klimaanpassung in der städtebaulichen Planung	115
W. KUTTNER, B. HOLLÓSI, M. GUBLER 12 Stadtklimatologie im Wandel der Zeit – Einblicke aus Deutschland, Österreich und der Schweiz	125
Examina im Jahr 2022	143

Stadtklima im Wandel

Zu diesem Heft

Liebe Leserin, lieber Leser,

das vor Ihnen liegende *promet*-Heft widmet sich der „Stadtklimatologie“. Es behandelt die unterschiedlichen und voneinander abhängigen Facetten dieses wichtigen Teilgebietes der Umweltmeteorologie in seiner mikro- und mesoskaligen Struktur. Das Anliegen des Herausgebers war es, ein kurzgefasstes, dennoch möglichst umfassendes Bild dieser faszinierenden Wissenschaftsdisziplin zu erstellen, die gleichermaßen grundlagen- wie anwendungsorientiert geprägt ist. Die angesehenen *promet*-Hefte, die seit Jahrzehnten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) mit großem Erfolg veröffentlicht werden, sind der meteorologischen Fortbildung verpflichtet. Genau das ist das Ziel auch dieser Ausgabe: Die wesentlichen Inhalte der Stadtklimatologie strukturiert, informativ und exemplarisch zu umreißen, sodass Leserinnen und Leser anderer Fachgebiete einen möglichst kompakten und optimalen Überblick über dieses Teilgebiet der Meteorologie erhalten. Bereits im Jahre 1979 erschien ein den stadtklimatischen Grundlagen gewidmetes *promet*-Heft, das sich allerdings ausschließlich auf die Darstellung der meteorologischen Elemente, wie der Veränderung von Strahlung und Energie sowie Feuchte und Wind in der urbanen Grenzschicht, fokussierte (*promet* 4/1979, „Stadtklima“). Den wichtigen Anwendungs- und Umsetzungsbezug meteorologischer Erkenntnisse für den urbanen Bereich hatte bereits 1973 der international bekannte Stadtklimatologe Helmut Landsberg in seinem zukunftsweisenden Beitrag „Stadtplanung“ beschrieben und nachdrücklich angemahnt (*promet* 4/1973, „Technoklimatologie“).

Da der vor Ihnen liegende Band sowohl den Anforderungen an die Grundlagenforschung als auch an die Anwendungspraxis unter Berücksichtigung neuer Mess- und Untersuchungsmethoden gerecht werden möchte, wird das Fachgebiet Stadtklimatologie in einer etwas umfangreicheren Bandbreite vorgestellt als Sie es vielleicht erwartet hätten.

In dem ersten Beitrag dieses Heftes werden die das Stadtklima prägenden Charakteristika beschrieben und damit der Rahmen für die Behandlung des Themas abgesteckt. Anschließend wird näher auf die Problematik von Wärme und Hitze sowie das Auftreten von Starkregenereignissen im städtischen Raum eingegangen. Da der Wind in der Stadt – insbesondere in seiner Wirkung auf die Luftqualität – ein besonders wichtiger Faktor ist, wird ihm ein eigener Abschnitt gewidmet und an Beispielen aus dem Ruhrgebiet gezeigt, wie sich die Luftqualität über die vergangenen Jahrzehnte gewandelt hat. Das städtische Wetter und Klima bestimmt in vielfältiger Weise die menschliche Gesundheit, sodass wichtige Forschungsergebnisse auch zu diesem Aspekt präsentiert werden. Der globale Anstieg der Lufttemperatur wirkt sich natürlich auch auf Städte aus und dort besonders auf Gebäude, in denen sich die Stadtbewohner überwiegend aufhalten. Indikatoren zum richtigen Maß an Wärme für das Innenraumklima zu benennen, ist deshalb ein wichtiges Anliegen des entsprechenden Textes. Grundsätzlich gilt: Je grüner und wasserdurchzogener eine Stadt ist, umso besser ist diese gegen den globalen Klimawandel gewappnet. Wie sich das am besten bewerkstelligen lässt, wird an Beispielen präsentiert. Für die Zukunft spielt es eine wichtige Rolle, – und wird hier in einem weiteren Beitrag auch aufgegriffen –, dass Energie möglichst ohne weiteren Ressourcenverbrauch gewonnen werden sollte, wozu sich Städte und Industriegebiete mit ihren großen Mengen an Abwärme besonders eignen. Was wäre die Meteorologie ohne Messungen und Modelle? Über bestehende und neueste Möglichkeiten zur Erfassung des physikalisch-chemischen Zustandes der Atmosphäre liefert ein weiterer Beitrag Einzelheiten. Welchen Stellenwert das Stadtklima in Planungsprozessen und auch in der Gesetzgebung seit einiger Zeit innehat, wird exemplarisch für verschiedene Planungs-Maßstabsebenen erläutert. Den Abschluss dieses *promet*-Heftes bildet ein kurzer Rückblick auf die wechselvolle Geschichte der Stadtklimatologie im deutschsprachigen Raum, die zeigt, dass grundlegende Prozesse der urbanen Atmosphäre zwar schon seit langem Bestand dieser Wissenschaftsdisziplin sind, deren detaillierte Quantifizierung aber erst gelang, nachdem neue Untersuchungsmethoden die Voraussetzung dafür schufen.

Die beiden Fachredakteure, Günter Gross und Wilhelm Kuttler, danken der Schriftleiterin *promet*, Frau Dipl.-Met. Magdalena Bertelmann, für die vertrauensvolle, überaus professionelle und zielorientierte Zusammenarbeit. Weiterhin gebührt Herrn Prof. Dr. Andreas Christen unser großer Dank für die fachliche Durchsicht der Artikel und die vielfältigen sehr hilfreichen Kommentare und Anregungen.

Günter Gross und Wilhelm Kuttler

W. KUTTLER, G. GROSS

1 Charakteristika des Stadtklimas

Urban climate characteristics

Zusammenfassung

Die wesentlichen Charakteristika des Stadtklimas, wie die Veränderungen des Strahlungs- und Wärmehaushalts, der urbanen Grenzschicht in ihrer Dynamik und Zusammensetzung sowie des Wasserhaushalts werden im Vergleich zum Umland beschrieben und deren Ursachen analysiert. Anhand von Einzelbeispielen wird erläutert, welche Wirkungen die städtische Bebauung auf die mikro- und mesoklimatischen sowie lufthygienischen Verhältnisse hat und welche Möglichkeiten bestehen, stadtklimatische Prozesse zu beeinflussen. Da Städte bereits heute schon wärmer sind als ihr rurales Umland, können sie als Vorboten des globalen Klimawandels angesehen werden, sodass klimaverbessernde Maßnahmen auf lokaler Ebene bereits heute entwickelt werden können.

Summary

The main characteristics of the urban climate, such as changes in the radiation and energy balance as well as the dynamics and composition of the urban boundary layer and the water balance, are described in comparison to the surrounding area and their causes are analysed. Using individual examples, the effects of urban impact on micro- and meso-climatic as well as air-hygienic conditions are explained and discussed which possibilities exist to influence urban climate processes. Since cities are already warmer than their surrounding rural areas, they can be seen as harbingers of global climate change, so that climate-improving measures can already be developed at the local level.

1 Einleitung

Die Stadtklimatologie beschäftigt sich mit der Untersuchung, Bewertung und Vorhersage der klimatischen und lufthygienischen Situation urban-industrieller Siedlungsräume. Diese unterscheiden sich im Allgemeinen von unbebautem, ruralem Freiland durch

- dichte Bebauung,
- großflächige – auch vertikale – Versiegelung,
- Vegetationsarmut,
- hohe Kraftfahrzeugdichte,
- Emission von Abwärme, partikulären und gasförmigen Luftverunreinigungen sowie Freisetzung von Treibhausgasen (z. B. CO₂, CH₄, N₂O).

Die genannten Faktoren führen in unterschiedlicher Weise zu den bekannten Eigenschaften des Stadtklimas: Überwärmung, geringe Windgeschwindigkeit bei vergleichbarer Höhe, Luftverschmutzung und Feuchtigkeitsarmut.

Durch diese vom Menschen hervorgerufenen Veränderungen bewirken Städte auch Klimamodifikationen, von der

Mikroskala bis hin zur Makroskala (KUTTLER und WEBER 2023). Je nach geographischer, topographischer und großklimatischer Lage sowie vorherrschender Wirtschafts-, Sozial- und Infrastruktur können dadurch sehr unterschiedliche Stadtklimatypen entstehen. Da in diesem Beitrag ausschließlich die grundlegenden Charakteristika des Stadtklimas präsentiert werden, soll von einer Darstellung verschiedener Varianten dieses Klimatyps mit Verweis auf entsprechende Literatur Abstand genommen werden (OKE et al. 2017).

Stadtklimatische Eigenschaften lassen sich besonders auf Basis der Differenzbildung einzelner gemessener meteorologischer Elemente (Δ -Werte) zwischen urban und rural geprägtem Gebiet nachweisen. Insofern kann auch verkürzt von einem „ Δ -Klima der Städte“ gesprochen werden. Das ist Gegenstand dieses Beitrags. Entsprechende Analysen der meteorologischen Unterschiede zwischen Stadt und Umland können mithilfe verschiedener Methoden erfolgen, so durch stationäre/mobile Messungen, mithilfe des Einsatzes physikalischer Modelle sowie durch Anwendung numerischer Modellierung (FOKEN et al. 2023).

2 Thermische und hydrologische Eigenschaften städtischer Oberflächen

Zwischen städtischem und rurealem Untergrund bestehen hinsichtlich der thermisch-physikalischen und hydrologischen Größen signifikante Unterschiede, die klimawirksam sind.

Wesentliches Kennzeichen urbaner Oberflächen ist ihre Versiegelung. Darunter wird eine mehr oder weniger vollständige Abdichtung des Untergrunds durch undurchlässige Stoffe verstanden. Der freie Austausch von Flüssigkeiten, insbesondere Wasser (durch Kapillarität), aber auch Gasen, zwischen der Oberfläche und den darunterliegenden Bodenschichten wird dadurch stark beeinträchtigt bzw. völlig verhindert. Zu den überwiegend in Städten verwendeten Baumaterialien zählen Stein, Beton, Stahl und Asphalt. Wie Tabelle 1-1 zeigt, zeichnen sich die genannten Stoffe im Vergleich zu naturbelassenem Boden (z. B. Lehm-boden) durch eine zum Teil außerordentlich starke Erhöhung des Wärmeeindring- (b) und Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten (λ) sowie der Wärmekapazitätsdichte (ζ) aus. Hohe Wärmeeindringkoeffizienten reduzieren die Oberflächentemperaturen und leiten verstärkt die tagsüber aufgenommene Energie in die Unterlage und verzögern dadurch das Eintreten der Maximaltemperatur an der Oberfläche bei mit der Tiefe zunehmender Dämpfung der Bodentemperaturwerte. Verfügt das verwendete Material darüber hinaus über hohe Wärmeleitungs- und -kapazitätswerte, so kann ein großer Teil der Energie durch den Wärmestrom (Q_s) in den Untergrund geleitet, dort gespeichert, und zeitversetzt wieder abgegeben werden (siehe Abschnitt 3). GleichermäÙen gilt das auch für den Wärmetransport in die (aus meist künstlichen Baumaterialien bestehenden) Oberflächenvergrößerungen pro Grundfläche (*surface enlargement*).

Hydrologische Eigenschaften typisch städtischer Oberflächen wie Abfluss, Versickerung, kapillarer Aufstieg von Bodenwasser und Grundwasserneubildung hängen stark

vom Versiegelungsgrad, dem Bodenporenvolumen und der Wasserverfügbarkeit ab. Für das Versiegelungsmaterial Asphalt ergaben sich nach WESSOLEK (2001) zum Beispiel Abflussspenden $> 70\%$ in Bezug auf die erfolgte Niederschlagssumme. Hingegen weisen häufig für Garageneinfahrten und Parkplätze verwendete Rasengittersteine nur einen Wert von etwa 5% auf. Bei den Versickerungswerten kehren sich die Werte jedoch um: In Asphalt dringen nach einem Niederschlagsereignis höchstens noch bis zu 10% ein, in Oberflächen, die aus teilversiegelten Flächen (Rasengitter- oder Betonverbundsteinen) bestehen, sogar bis zu 60% . Da die Verdunstung eine wichtige Steuerungsgröße in Bezug auf eine Minderung der städtischen Überwärmung darstellt, sind nicht oder teilversiegelte Flächen in klarem Vorteil, denn sie erhöhen die latente Wärmeflussdichte (Q_E). Völlig andersartig wirken sich Böden mit aufgebrachtten Verdunstungssperrschichten (z. B. Kies) aus, denn diese lassen zwar Wasser versickern, dieses jedoch wegen der fehlenden Kapillarität des Substrats während einer Trockenphase nicht wieder aufsteigen. Hieraus resultieren höhere Grundwasserneubildungsraten als für naturbelassene Flächen. Das zeigt, dass ein Stadtgebiet hinsichtlich der Grundwasserneubildung als sehr differenziert in Bezug auf seine Oberflächenbeschaffenheit zu betrachten ist.

3 Strahlungs- und Energiebilanz

Die Strahlungs- und Energiebilanz beruht in vereinfachter Form auf den in Gleichung (1) enthaltenen Termen und bezieht sich in der Regel auf eine ebene (masselose) Bodenoberfläche während advektionsarmer, niederschlagsfreier Witterung. In Stadtgebieten ist als zusätzlicher Faktor die „anthropogene Wärme“ (Q_F) zu berücksichtigen. Hierbei handelt es sich um diejenige Abwärme, die durch technische Prozesse (z. B. Industrie, Kfz, Gebäudeklimatisierung, Stromverbrauch), aber auch durch den Metabolismus von Mensch und Tier freigesetzt wird.

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

Tabelle 1-1: Thermische Eigenschaften künstlicher und natürlicher Materialien (nach ZMARSLY et al. 2007).

Material		Wärmekapazitätsdichte ζ ($J m^{-3} K^{-1}$)	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient λ ($W m^{-1} K^{-1}$)	Wärmeeindringkoeffizient b ($J m^{-2} s^{-0.5} K^{-1}$)
Asphalt		$1,94 \cdot 10^6$	0,75	1205
Beton	Gasbeton	$0,28 \cdot 10^6$	0,08	150
	Schwerbeton	$2,11 \cdot 10^6$	1,51	1785
Naturstein		$2,25 \cdot 10^6$	2,19	2220
Backstein	durchschnittlich	$1,37 \cdot 10^6$	0,83	1065
Lehmziegel	durchschnittlich	$1,77 \cdot 10^6$	0,84	1220
Stahl		$3,93 \cdot 10^6$	53,30	14475
Lehmboden (40 % Porenvolumen)	trocken	$1,42 \cdot 10^6$	0,25	600
	gesättigt	$3,10 \cdot 10^6$	1,58	2210

Die Pfeile in Gleichung (1) geben die Flussrichtungen der Strahlungsströme an. Konventionsgemäß werden diejenigen zur Oberfläche als positiv, die in die Atmosphäre gerichteten als negativ bezeichnet. Die Einheit ist jeweils $W\ m^{-2}$.

Art, Gliederung und Nutzungsstruktur versiegelter und nicht versiegelter urbaner horizontaler und vertikaler Oberflächen bewirken unterschiedlich starke Einflüsse auf die genannten Flussdichten.

Im Vergleich zu naturbelassenem Umland sind sowohl die Globalstrahlung ($K\downarrow$) – aufgrund der Luftverschmutzung – als auch die Reflexion ($K\uparrow$) – wegen der teilweise in den Straßenschluchten auftretenden mehrfachen Reflexionsmöglichkeiten – reduziert (Tabelle 1-2). Die langwellige Ausstrahlung ($L\uparrow$) erreicht bei meist höheren urbanen Oberflächenstrahlungstemperaturen größere Werte; die Stärke der langwelligeren atmosphärischen Gegenstrahlung ($L\downarrow$) entspricht im Wesentlichen derjenigen des Umlands. Verstärkt werden kann dieser Wert in der Stadt jedoch zum Beispiel durch das Vorhandensein einer Dunstglocke, höhere Temperaturen der städtischen Grenzschicht (*Urban Boundary Layer*, UBL) und/oder durch das Vorherrschen eines kleinen Himmelssichtfaktors (ψ , siehe Abschnitt 5) von beidseitig bebauten Straßenschluchten ($0 < \psi \ll 1$). Während die kurzwellige Strahlungsbilanz (K^*) im Allgemeinen kaum Unterschiede zwischen Stadt und Umland aufweist, lassen sich größere Differenzen für die langwellige Strahlungsbilanz (L^*) erkennen, die auch den niedrigeren urbanen Strahlungsbilanzwert (Q^*) dominieren.

Die Wärmebilanz (Tabelle 1-2) wird – neben dem Bodenwärmestrom (Q_s), der sich im Jahresmittel weitgehend ausgleicht und hier deshalb nicht betrachtet wird – in einer mitteleuropäischen Stadt überwiegend durch den turbulenten sensiblen Wärmestrom (Q_H), im Umland hingegen durch den turbulenten latenten Wärmestrom (Q_E) bestimmt. Das Bowenverhältnis ($Bo = Q_H/Q_E$) erreicht für das hier genannte Beispiel in der Stadt einen mittleren Wert von $Bo_{urb} = 1,9$, im Umland hingegen nur einen solchen von $Bo_{rur} = 0,2$. Würde die in Tabelle 1-2 für Q_E genannte Energie in Gänze für die Verdunstung von Wasser aufgewendet, könnten damit etwa 190 mm a^{-1} in der Stadt und rund 650 mm a^{-1} im Umland über Q_E in die Atmosphäre abgeführt werden. Damit zeichnet sich der urbane Standort durch einen wesentlich geringeren (Verdunstungs-) Kühleffekt im Vergleich zum Umland aus. Das ist grundsätzlich human-biometeorologisch von großer Bedeutung. Insbesondere vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels mit einer projizierten Häufung wärmebelastender Situatio-

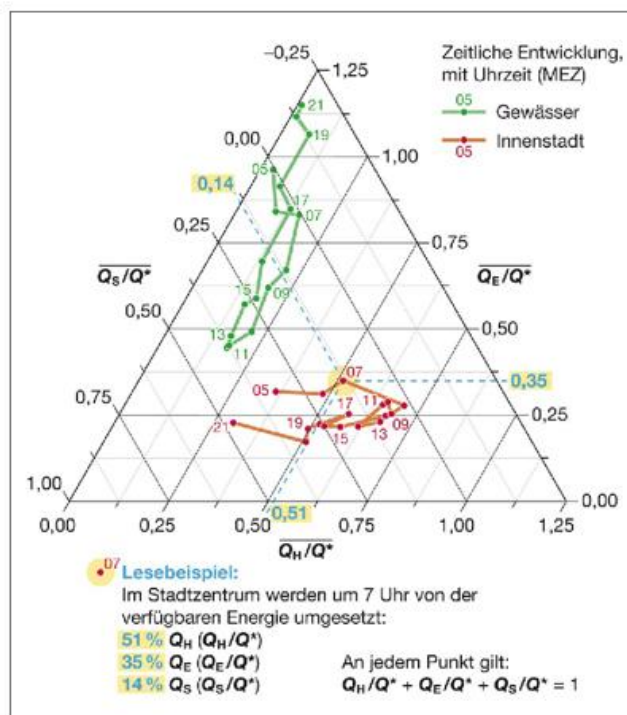


Abbildung 1-1: Tagesgang der mittleren stündlichen Energieaufteilung für einen Innenstadt- und Umlandstandort (Gewässernähe) in Essen (Zeitraum: 06/2012 – 05/2013; $Q^* > 0\ W\ m^{-2}$, Q_s wurde residual aus der Energiebilanz bestimmt; aus KUTTLER et al. 2015).

nen stellt diese Kühlungsmöglichkeit bei der Planung klimaresilienter Städte ein wirkungsvolles und damit unverzichtbares Handwerkszeug dar (MATZARAKIS 2023, EMEIS 2023).

Die einzelnen Wärmebilanzterme beanspruchen sowohl in der Stadt als auch im Umland jeweils sehr unterschiedliche Anteile an der Strahlungsbilanz Q^* . Exemplarisch ergibt sich für die mittlere tagesstündliche Aufteilung folgendes Bild (Abb. 1-1): Der Verlauf der Werte für den urbanen Standort ist überwiegend horizontal ausgerichtet. Das bedeutet, dass in der Stadt der turbulente sensible Wärmestrom im Vergleich zur latenten Wärme eine wesentlich größere Tagesamplitude aufweist. Im Umland ist es umgekehrt, dort dominiert Q_E deutlich über Q_H . Ein Blick auf die fortlaufenden Werte zwischen 5 Uhr morgens und 21 Uhr abends zeigt für den Stadtstandort, dass der Anteil der von Q^* auf Q_H entfällt, bis mittags auf etwa 70 % ansteigt, um anschließend gegen Abend auf Werte um 30 % – vergleichbar morgens – abzunehmen. Der Anteil, der tagsüber auf Q_E entfällt, erreicht hingegen nur eine Spanne von 20 % bis 35 %, derjenige von Q_s von 0 % bis 50 %.

Tabelle 1-2: Tagesmittelwerte der Strahlungsbilanzglieder für einen Stadt- und Umlandstandort in Essen (in $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ (ohne Q_s und Q_r); Zeitraum: 06/2012 – 05/2013; aus KUTTLER et al. 2015).

	$K\downarrow$	$K\uparrow$	K^*	$L\downarrow$	$L\uparrow$	L^*	Q_H	Q_E	Q^*
Urban	9,3	1,1	8,2	28,3	32,7	-4,4	2,5	1,3	3,8
Rural	9,8	1,6	8,2	28,9	31,7	-2,8	0,9	4,5	5,4

Der völlig andersartige, nämlich annähernd eher senkrechte Verlauf der Anteile der ruralen Energiebilanzglieder an Q^* ergibt folgendes Bild: Prägend für den Tag dieses Standorts ist der Term Q_E , der eine Spanne von etwa 45 % (mittags) bis 115 % (abends) einnimmt. Die über 100 % hinausgehenden Werte werden aus dem Bodenwärmestrom (Q_S) substituiert, der deshalb in den Abendstunden negative Werte annimmt. Der Anteil des turbulenten sensiblen Wärmestroms Q_H liegt tagsüber deutlich unter 25 %, in den frühen Morgen- und Abendstunden sogar unter 10 %. Dieser spielt damit im ruralen Bereich nur eine untergeordnete Rolle.

Den Betrag der anthropogenen Wärme (Q_F) in Städten zu ermitteln, ist relativ aufwendig und häufig ungenau, da überwiegend auf Schätzungen beruhende Berechnungen entsprechend freigesetzter Energien (z. B. Technik, Heizwärme, menschlicher Körper) herangezogen werden müssen (OKE et al. 2017).

Eine exemplarisch für ein umfangreiches Kollektiv nordamerikanischer Städte („Sommer-“ und „Winterstädte“) durchgeführte Erhebung dürfte für westliche Industrienationen als mehr oder weniger repräsentativ angesehen werden können (SAILOR et al. 2015). Die hier zitierten Angaben wurden zur besseren Vergleichbarkeit als mittlere Leistung pro Stadtfläche ($W\ m^{-2}$) berechnet. Hiernach belaufen sich die Q_F -Flüsse im Sommer auf durchschnittlich $8\ W\ m^{-2}$, im Winter auf $12\ W\ m^{-2}$ und bewegen sich in Bezug auf die jeweiligen natürlichen Strahlungsbilanzen (Q^*) im einstelligen Prozentbereich. Allerdings können in dicht bebauten Innenstadtbereichen, vor allem im Winter, die Q_F -Werte dominierend werden.

4 Temperaturverhältnisse

Städte weisen – vergleichsweise zum Umland – im Durchschnitt sowohl höhere Oberflächen- als auch Lufttemperaturen auf (SCHERER 2023). Für die städtische Überwärmung ΔT sind verschiedene Gründe verantwortlich (ZHOU et al. 2016). Dazu gehören im Wesentlichen die Veränderung der Bodenoberfläche bzw. des Baumaterials (großer Anteil vertikaler Flächen (*surface enlargement*), kleinere Albedo, stärkere Versiegelung, höhere Rauigkeit und Wärmespeicherfähigkeit der Materialien, geringere Verdunstung), die anthropogene Wärmeabgabe (Q_F) und – in Einzelfällen – eine höhere langwellige Gegenstrahlung (L_1) infolge der Luftverschmutzung. Für die urbane Überwärmung wurde, erstmals offensichtlich im Jahre 1947 (BALCHIN und PYE 1947, KUTTNER et al. 2023), der Begriff „städtische Wärmeinsel“ (*Urban Heat Island*, UHI) eingeführt. Damit wird stark generalisierend das Faktum einer inselartig ausgeprägten urbanen Überwärmung beschrieben, die von einem kühleren Freiland umgeben wird. Der Begriff ist in strengem Sinne irreführend, da in der Realität nur größere Baukörper, allenfalls einzelne Stadtteile und selten ganze Stadtkörper eine homogene Überwärmung gegenüber dem Umland aufweisen. Weiterhin bestimmt die Lage und die

Beschaffenheit der bodennahen Oberflächenverhältnisse im Umland den Grad der Überwärmung, sodass besser von einem Wärmearchipel gesprochen werden sollte; dieser Begriff hat sich jedoch nicht durchgesetzt.

In welchem Maße die Lage von Umlandstandorten die Intensität von UHIs beeinflusst, zeigt exemplarisch Abbildung 1-2. Hier wurden für verschiedene Umlandstationen die mittleren Lufttemperaturdifferenzen zu einer Stadtstation und damit die jeweilige UHI-Intensität berechnet. Mit Ausnahme der Stadtwaldstation erreichen die nächtlichen Lufttemperaturen in der Stadt im Vergleich zum Umland höhere Werte, das heißt in den Nachtstunden überwiegen maximale, tagsüber minimale Abweichungen. Die mittleren Schwankungen der UHI-Intensitäten liegen zwischen 0,5 K und 2 K, mit unterschiedlich hohen Standardabweichungen (bedingt beispielsweise durch Kaltlufttransporte oder Bodenfeuchtedifferenzen). Wie auch diese Daten zeigen, ist die UHI eine relative Größe, deren Intensität durch die Lage der Umlandstationen bestimmt wird.

Für städteübergreifende Vergleiche der UHI-Intensitäten sollten die Beobachtungen einer Normierung hinsichtlich der topographischen Lage, der Untergrundbeschaffenheit sowie der Messanalytik unterzogen werden, um belastbare quantifizierende Angaben zu generieren. Hierzu haben BARANKA et al. (2016) sowie SCHLÜNZEN et al. (2022) Vorschläge gemacht.

Üblicherweise bezieht sich die urbane Überwärmung auf die in 2 m Messhöhe über Grund ermittelte Lufttemperatur, die der Stadthindernisschicht (*Urban Canopy Layer*, UCL) zuzuordnen ist und deshalb UHI_{UCL} genannt wird. Ferner werden, je nach Messort, eine Oberflächen- (UHI_{SFC}), Untergrund- (UHI_{SUB}) und Grenzschichtwärmeinsel (UHI_{UBL}) unterschieden. Die Problematik der mit unterschiedlichen Messmethoden nachgewiesenen urbanen Wärmeinseln (Luft- oder Oberflächenstrahlungs-UHI) mittels Satellit, Hubschrauber, Drohnen sowie durch stationäre bzw. mobile Messwerterfassung, wird bei PARLOW et al. (2014) diskutiert. Die städtische Überwärmung kann auch Ursache für die Entstehung stadteigener Windsysteme (SHAPIRO und FEDOROVICH 2019) und deren Belüftungsmöglichkeiten (GROSS 2021) sein, für die Veränderung der städtischen Luftfeuchtigkeit (KUTTNER et al. 2015), die Stabilitäts- und Mischungsschichtverhältnisse (PIRINGER et al. 2007) sowie die Beeinflussung der Luftverschmutzung (ULPIANI 2020).

Trenduntersuchungen in Bezug auf die langzeitige Veränderung von *Urban Heat Islands* ergeben für ausgewählte Städte zum Teil sehr unterschiedliche Ergebnisse (Abb. 1-3). Kommt es im Laufe der Zeit zu globalen oder überregionalen Temperaturveränderungen, so betreffen diese sowohl Stadt als auch Umland. In erster Näherung ist dann davon auszugehen, dass die urban-ruralen Differenzen in etwa konstant bleiben. Allerdings kann durch zusätzliche Bautätigkeit, Bevölkerungswachstum und Verdichtung in einer Stadt deren Übertemperatur im Vergleich zum Umland

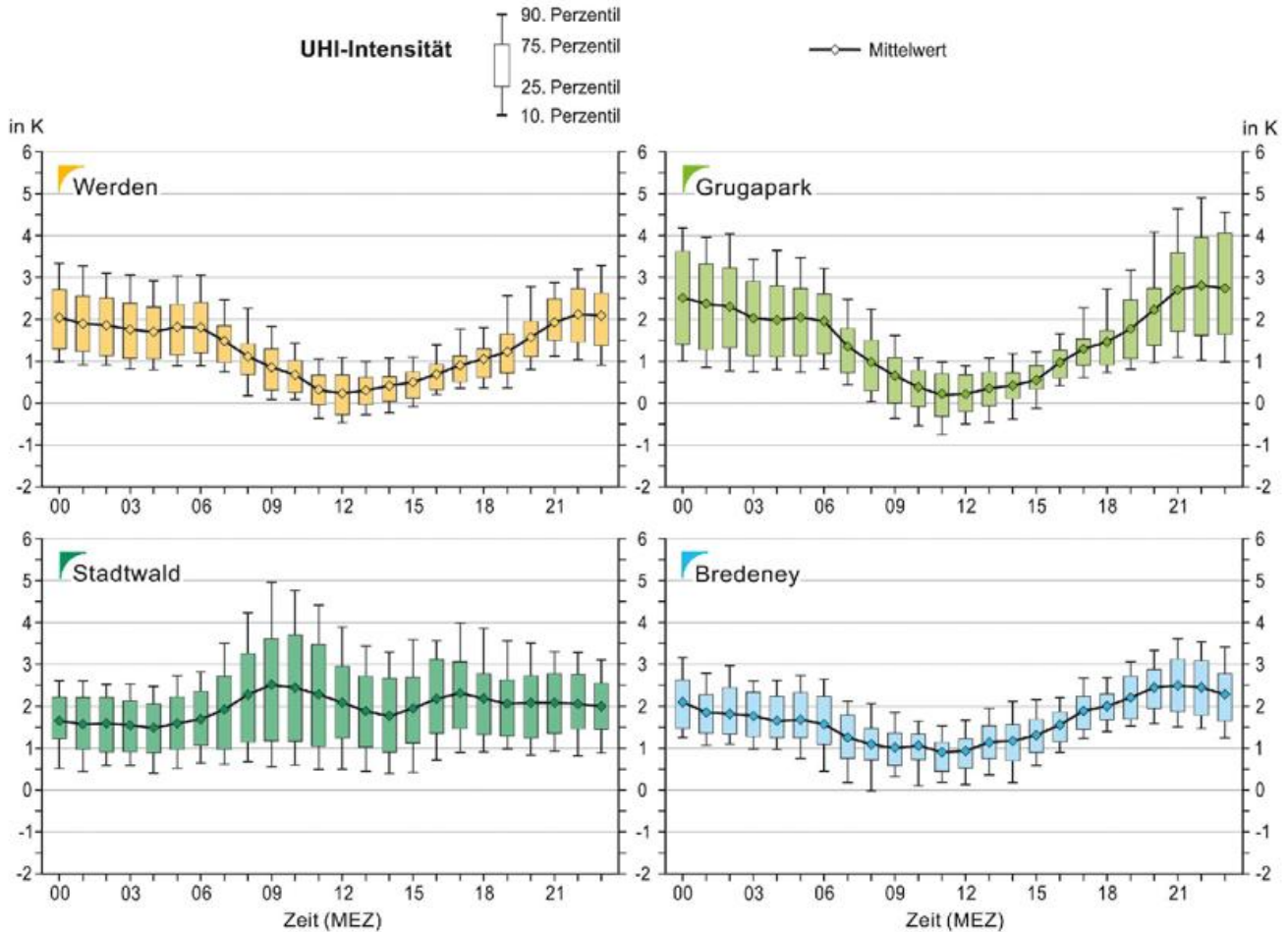


Abbildung 1-2: Mittlerer Tagesgang der Urban Heat Island-Intensität (UHI) anhand der Lufttemperaturdifferenzen zwischen einer Innenstadystation und vier nicht innerstädtischen Stationen während 74 austauscharmer Strahlungstage in Essen (Stundenmittelwerte; Zeitraum: 06/2012 – 05/2013; aus KUTTLER et al. 2015).

während des zugrunde gelegten Zeitraums lokal zugenommen und sich damit von einer überregional gesteuerten ruralen Temperaturveränderung abgekoppelt haben. Die in Abbildung 1-3 dargestellten Trends weisen somit relativ uneinheitliche Verläufe auf: Während zum Beispiel Städte wie Warschau und Ljubljana eine Zunahme der UHI-Intensität zeigen, haben die entsprechenden Werte für Stuttgart und Prag langfristig eher abgenommen. Hieraus resultiert, dass Aussagen über die Wirkung des globalen Klimawandels auf die UHI mit Unsicherheiten behaftet sind (vgl. hierzu auch OKE et al. 2017).

Urban Heat Islands können für ein Stadtkösystem von Vor-, aber auch Nachteil sein. Zu den Vorteilen zählt eine geringere Anzahl an Heizgradtagen (VDI 2013) während der kalten Jahreszeit, wodurch Energie bei der Ge-

bäudebeheizung eingespart und weniger Treibhausgase freigesetzt werden (KRIESTEN et al. 2023). Weiterhin wird seltener eine Beseitigung von Schnee und Eis auf Stadtstraßen notwendig sein, was wiederum Ressourcen schont (BRANDT 2007).

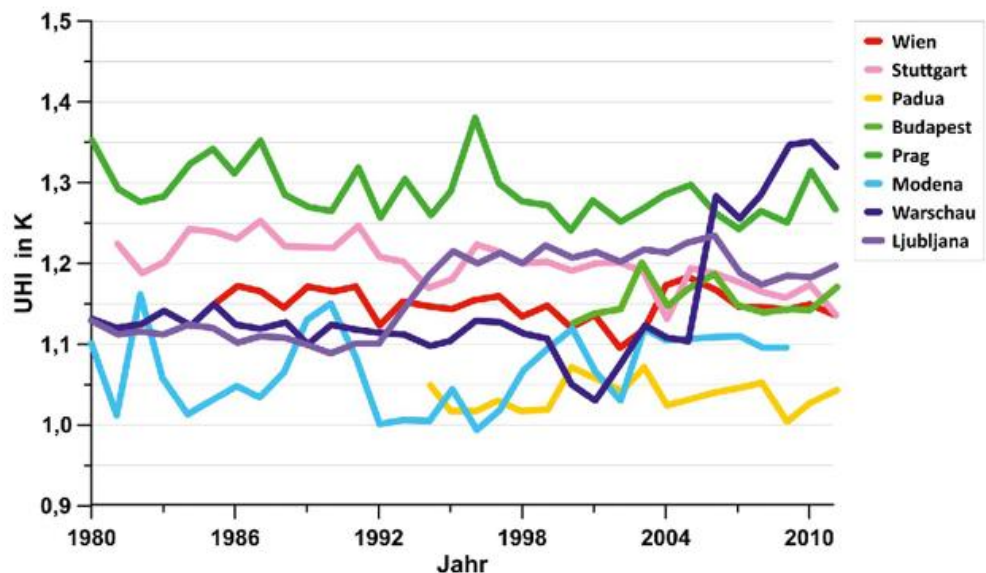


Abbildung 1-3: UHI-Trends für verschiedene Städte (nach MAHDAVI et al. 2016).

Besondere Vorteile der urbanen Überwärmung können in Städten polarer Breiten mit winterstrenghem Klima gesehen werden. So werden zum Beispiel in sibirischen Städten UHI-Intensitäten von bis zu 5 K erreicht, was zu einer erheblichen Verminderung der Anzahl an Heizgradtagen führt und damit den Energieverbrauch für die Gebäudebeheizung reduziert (LARUELLE et al. 2019). Sommerliche längere Überwärmungs- oder gar Hitzeepisoden wirken sich hingegen meist nachteilig und häufig belastend auf den menschlichen Wärmehaushalt aus (MATZARAKIS 2023). Unerwünschter Überwärmung kann durch verschiedene Kühlungsmöglichkeiten vorgebeugt werden, so durch planerische Maßnahmen (baulicher Schattenwurf), Vegetation (Schattenwurf durch Bäume und Transpiration (PAULEIT et al. 2023)) sowie durch Einsatz von Klimaanlage (BUCHIN et al. 2016, BAUMÜLLER und KATZSCHNER 2023).

5 Stadtatmosphäre und Windverhältnisse

Die durch die dreidimensionale Struktur der Bebauung vorgegebene Komplexität eines Stadtkörpers führt zu einer charakteristischen Veränderung im Aufbau der bodennahen Atmosphäre. Stark generalisierend ergibt sich das in Abbildung 1-4 gezeigte idealisierte Bild der Stadtatmosphäre.

Die planetarische Grenzschicht fächert sich über einem Stadtgebiet im Vergleich zum strömungshindernisärmeren Umland in eine Bodenschicht („Prandtl-Schicht“) und eine darüber liegende Mischungsschicht auf. Beide Schichten werden zur städtischen Grenzschicht (*Urban Boundary Layer, UBL*) zusammengefasst. Die Mächtigkeit der Bodenschicht wird in der Regel mit $\leq 10\%$ der Grenzschichthöhe angegeben. Die Bodenschicht kann wiederum

– in Abhängigkeit von der Bebauungsstruktur – in eine von der Erdoberfläche bis in die mittlere Bebauungshöhe reichende Stadthindernisschicht (*Urban Canopy Layer, UCL*) und eine darüber liegende Stadtreibungsschicht (*Urban Roughness Sublayer, URS*) unterteilt werden. Beide Schichten sind nicht eindeutig voneinander getrennt, sondern gehen mit dem abnehmenden Einfluss der Bebauungshöhe ineinander über. Die Luftbewegung in beiden Schichten wird durch Advektion und unterschiedlich starke mechanische und thermische Turbulenz bestimmt, deren Ursachen in der Stellung, der Größe und dem Abstand einzelner Gebäude voneinander, sowie deren thermische Eigenschaften zu sehen sind. Ein Maß zur Charakterisierung der Straßenschluchtgeometrie stellt die Horizonteinschränkung dar, die durch das Verhältnis der Höhe der Straßenrandbebauung zur Straßenbreite verursacht wird. Zu ihrer Quantifizierung wird zumeist der Himmelssichtfaktor (Ψ) herangezogen. Weitständig bebaute Flächen mit geringer Horizonteinschränkung werden in der Regel durch große Ψ -Werte ($> 0,6$), verdichtete Innenstädte hingegen durch kleine Werte ($0,2 < \Psi < 0,6$) charakterisiert.

Höhere Windgeschwindigkeiten modifizieren die beschriebene Struktur der einzelnen Schichten der Stadtatmosphäre (SEDLMEIER und TINZ 2023). So entwickelt sich ihre Mächtigkeit leewärts vom Rauigkeitssprung zwischen Stadt und Umland in Abhängigkeit von der Stärke der Wechselwirkungen mit der Unterlage, sodass die städtische Abluftfahne mehrere Kilometer ins Umland umgelenkt wird.

Besonders innerhalb der Stadthindernisschicht werden die Windverhältnisse durch die vorhandene Bebauung stark modifiziert. In welchem Maße die Windrichtung durch urbane Standortcharakteristika (Kanalisierungseffekte durch Straßenschluchten, hohe Gebäude) beeinflusst wird, zeigen exemplarisch die Windrosen an einzelnen Stadtstationen (Abb. 1-5). Die Unterschiede zur Hauptwindrichtung S/SW an der DWD-Umlandstation Essen-Bredeney sind erheblich.

Auch die atmosphärischen Stabilitätsverhältnisse zwischen einem urbanen und einem Umlandstandort unterscheiden sich deutlich voneinander. So tendiert die städtische Atmosphäre vor allem nachts durch die von der Baumasse abgegebene Energie ($L\uparrow$, Q_H) dazu, einen leicht höheren Anteil neutraler und instabiler Schichtungszustände auf-

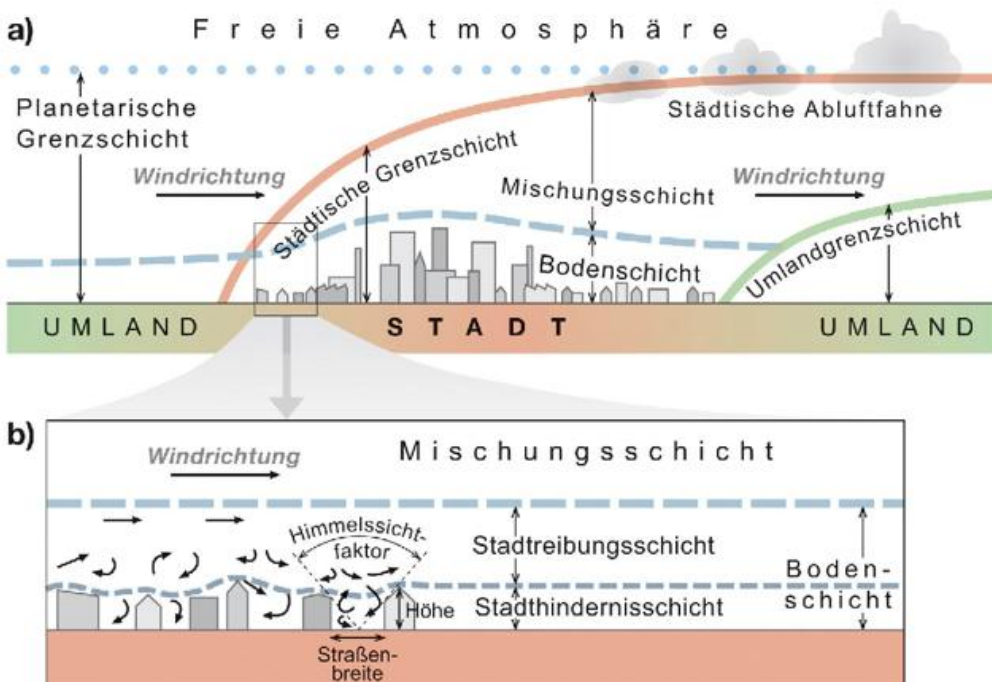


Abbildung 1-4: Vertikaler Aufbau der Stadtatmosphäre (OKE 1997; hier nach KUTTLER 2010, verändert).

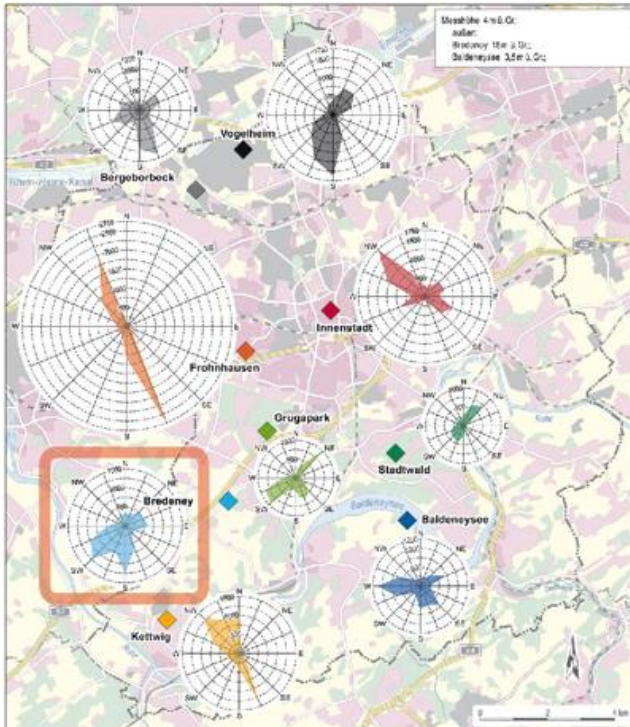


Abbildung 1-5: Windrichtungsverteilung (in 10 m über Grund) in Essen. Die Umlandstation Essen-Bredenei ist hervorgehoben (aus KUTTLER et al. 2015).

zuweisen, während sich tagsüber, insbesondere bei starker Einstrahlung, häufiger atmosphärische Labilität durchsetzt (CHRISTEN und VOGT 2004, WEBER und KORDOWSKI 2010).

Ferner weist die städtische Mischungsschichthöhe tagsüber höhere und nachts geringere Mächtigkeiten auf, die im Sommer verstärkt, im Winter hingegen vermindert sind (LOTTERANER und PIRINGER 2016).

Herrscht eine gradientschwache Witterung vor, kann – geeignete topographische und meteorologische Bedingungen vorausgesetzt – eine durch die urbane Überwärmung angetriebene Windbewegung insbesondere nachts kühlere

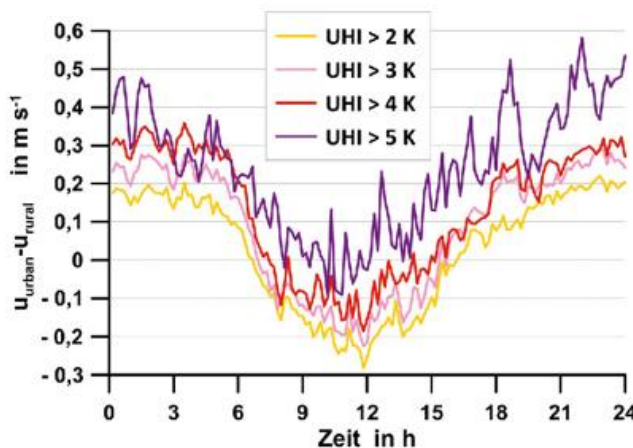


Abbildung 1-6: Differenzen der Windgeschwindigkeit Stadt-Umland in Abhängigkeit von der maximalen UHI-Intensität im Tagesgang (nach GROSS 2019).

Luft von Grünflächen und/oder dem Umland in die Innenstädte transportieren (GROSS 2019). Wie Abbildung 1-6 zeigt, hat nicht nur der Tagesgang, sondern auch die Stärke der städtischen Wärmeinsel UHI einen Einfluss auf die Größe der Windgeschwindigkeitsdifferenz zwischen Stadt und Umland. So ist deutlich zu erkennen, dass nachts infolge des thermischen Antriebs und der verstärkten turbulenten Durchmischung aufgrund der geringeren atmosphärischen Stabilität die Windbewegung in der Stadt größer sein kann als im Umland.

Aus human-biometeorologischer Sicht kann der genannte Kühllufttransport zum Abbau der thermischen Belastung nicht nur in den Straßenschluchten, sondern auch in Innenräumen (KRIESTEN et al. 2023), vor allem während heißer Tage bzw. der Dauer von Hitzewellen, führen (GROSS 2021).

6 Niederschlag

Die Wirkung von Städten auf Niederschlagsprozesse ist außerordentlich komplex. Gleichermäßen stellt dies ein wichtiges Forschungsthema dar, dessen Ergebnisse nicht nur für die Grundlagenforschung, sondern auch für den Anwendungsbezug, zum Beispiel für den vorsorgenden Umweltschutz, von besonderem Interesse sind.

Zu den einflussnehmenden Faktoren auf das Niederschlagsverhalten gehören die städtische Überwärmung, die Reduktion der Windgeschwindigkeit durch die urbane Oberflächenrauigkeit, Konvergenz- und Divergenzprozesse in der städtischen Grenzschicht sowie der Gehalt an Aerosolen in der Stadtatmosphäre. Diese Variablen wirken einzeln oder gemeinsam, positiv oder negativ, synergistisch oder auch antagonistisch auf die Niederschlagsbildung. Eine exakte quantitative Analyse dieser Interdependenzen vorzunehmen, ist deshalb schwierig und bisher noch nicht zufriedenstellend gelungen.

Dass die Verstädterung einen generellen – lokal allerdings sehr unterschiedlichen – Einfluss auf die Niederschlagstätigkeit hat, wurde schon seit langem vermutet (KRATZER 1956, LANDSBERG 1981). Systematisch und in großem Stil untersucht wurde dieses Problem jedoch erst in den 1970er Jahren im Rahmen des umfangreichen Vorhabens *Metropolitan Meteorological Experiment* (METROMEX), das in St. Louis, MO, USA, durchgeführt wurde. Die Analyse erbrachte das statistisch plausible Ergebnis einer signifikanten mittleren Niederschlagszunahme von 10 % bis 17 % im urbanen Abwindbereich (Lee der Städte) im Vergleich zu unbeeinflussten Umlandmessergebnissen (CHANGNON 1981).

Auf einer breiteren statistischen Basis (Messungen und Modellierungen) fußte eine von LIU und NIYOGI (2019) durchgeführte standardisierte Metaanalyse (> 2000 Veröffentlichungen), deren Eingangsdaten allerdings überwiegend auf Auswertungen nordamerikanischer und chinesi-

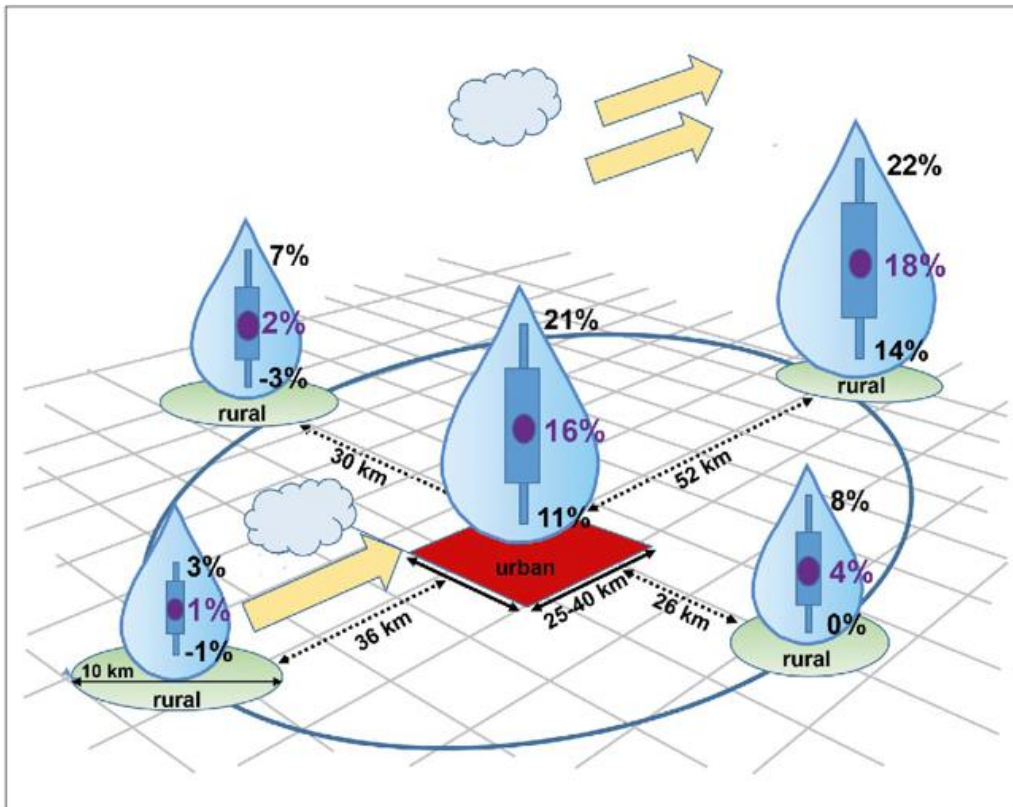


Abbildung 1-7: Verteilung der mittleren Niederschlagsänderungen im Vergleich zum unbeeinflussten Umland über und neben einer Stadt (nach LIU und NIYOGI 2019).

scher Millionenstädte beruhen. Aus dem genannten Veröffentlichungskollektiv konnten letztendlich 85 Studien detailliert ausgewertet werden. Es zeigten sich Niederschlagsänderungen nicht nur in Stadtgebieten, sondern auch in deren Umgebung (Abb. 1-7; die ausgefüllten Säulen geben eine Standardabweichung an, ergänzt um die Spannweitenbereiche R): Die insgesamt fünf Cluster mit erhöhtem Niederschlag verteilten sich neben dem hier als fiktiv anzunehmenden Stadtzentrum in unterschiedlichen Entfernungen auf Luv- und Leestandorte sowie auf Flächen, die in Bezug auf die jeweils vorherrschende Windrichtung Maxima sowohl rechts (26 km vom Stadtzentrum) als auch links (30 km vom Stadtzentrum) auftraten. Im statistischen Mittel ergab sich hiernach ein mittleres Niederschlagsmaximum in Lee von Städten (Entfernung Stadtzentrum: 52 km) mit der höchsten Zunahme unter den fünf Clustern von 18% ($14\% < R < 22\%$). Die Werte im Stadtzentrum selbst erreichten 16% ($11\% < R < 21\%$). Die geringste Niederschlagsänderung ergab sich erwartungsgemäß für den Luvstandort (36 km im Aufwindbereich des Stadtzentrums) mit 1% ($-1\% < R < 3\%$). Auf der rechten und linken Seite der Stadt (jeweils bezogen auf die vorherrschende Windrichtung) beliefen sich die Erhöhungen auf ebenfalls niedrige 4% respektive 2% bei relativ hohen Standardabweichungen.

So hilfreich diese auf einem großen Datenkollektiv beruhenden Angaben auch sind, kann ihnen allerdings nicht entnommen werden, welcher oder welche der oben genannten niederschlagsbeeinflussenden Faktoren (UHI, Aero-

sole, Oberflächenrauigkeit) dominierend war. Weitere Untersuchungen müssen hierzu abgewartet werden. Interessanterweise hat diese Metaanalyse im Wesentlichen Ergebnisse bestätigt, die bereits fast 50 Jahre zuvor durch die sorgfältigen Messungen in acht nordamerikanischen Städten vorgenommen wurden (HUFF und CHANGNON 1973).

Die Kenntnis über niederschlagsverändernde Prozesse durch eine Stadt ist nicht nur für deren Wassermanagement, sondern auch für den Katastrophenschutz wichtig, um zum Beispiel bei Starkregenereignissen potenzielle Überflutungsbereiche vorherzusagen (vgl. hierzu auch WINTERRATH et al. 2023).

7 Luftqualität

Die Zusammensetzung der Luft, und in der Folge auch die Luftqualität von Städten, hat unter anderem Auswirkungen auf die Strahlungsbilanz und insbesondere auf die Gesundheit der Stadtbewohner. Die Luftgüte hat sich in den vergangenen Jahrzehnten in Mitteleuropa wesentlich verbessert (SICARD et al. 2021, WURZLER et al. 2023). Nach wie vor sind es jedoch hauptsächlich gas- und partikelförmige Emissionen aus niedrig gelegenen Quellen (Kfz-Verkehr, Hausbrand, Gewerbe), die sich belastend auf die Bevölkerung auswirken. Zusätzlich können bei heißer Witterung bestimmte Baumarten (insbesondere Platanus x acerifolia) durch erhöhte Emission des Vorläufergases Isopren die Ozonproduktion lokal verstärken (SIMON et al. 2019, WAGNER und KUTTLER 2014). Des Weiteren wird die Stadtatmosphäre im Winter insbesondere in Wohngebieten wegen der Verbrennung von Holz in Hauskaminen durch Partikel angereichert und je nach meteorologischer Situation durchaus erheblich belastet (KÜPPER et al. 2018).

Neben typischen gasförmigen Spurenstoffen wie NO , CO , NO_2 , SO_2 , flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen (*Volatile Organic Compounds*, VOC) sowie O_3 spielen bei der Beurteilung der Luftqualität insbesondere PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$ eine besondere Rolle. Die Höhe der Immissionskonzentration ist nicht nur von der Art der Flächennutzung, sondern auch von der atmosphärischen Transmission abhängig.

Tabelle 1-3 enthält exemplarisch jeweils Jahresmittelwerte für städtische Hintergrund-, Verkehrs- und Waldstationen des Großraums Rhein-Ruhr. Die SO₂-Konzentration spielt in diesem Gebiet – und das gilt für den größten Teil des westlichen Mitteleuropas – keine Rolle mehr, sodass dieser Spurenstoff an den meisten Messstationen nicht mehr erfasst wird. NO₂ und NO weisen erwartungsgemäß an den Verkehrsstationen höhere Werte auf als im städtischen Hintergrund und in den Waldgebieten. Die mittleren O₃-Konzentrationen erreichen hingegen an Waldstandorten höchste Werte, im städtischen Hintergrund sind diese jedoch deutlich reduziert. Die Immissionssituation von PM₁₀ an Verkehrsstandorten erreicht erwartungsgemäß höhere Werte als an den städtischen Hintergrundstationen; in Waldgebieten spielen diese nur eine untergeordnete Rolle (WURZLER et al. 2023).

Die Verteilung von Luftverunreinigungen in Stadtgebieten beruht neben der Höhe der Windgeschwindigkeit und der -richtung sowie dem Turbulenzgrad auf den Stabilitätsverhältnissen der urbanen Grenzschicht. Wegen der meist geringeren Windbewegung innerhalb der Stadthindernisschicht ist der atmosphärische Austausch hier im Vergleich zum Freiland herabgesetzt, was die Akkumulation von Luftschadstoffen, aber auch von Wärme, begünstigen kann.

8 Städte im Klimawandel

Die zur Entwicklung des globalen Klimawandels durchgeführten Projektionen (IPCC 2021) belegen, dass in Zukunft sowohl Häufigkeit, Stärke und Dauer von Hitzewellen in Mitteleuropa zunehmen und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Starkregenereignissen größer werden als auch von einer Zunahme vegetationsschädigender Dürren ausgegangen werden muss. Höhere Temperaturen können unter der Bevölkerung zu stärkeren gesundheitlichen Problemen (ansteigende Morbiditäts- und Mortalitätsraten) führen (ZACHARIAS und KOPPE 2015). Weiterhin bewirken höhere Lufttemperaturen verstärkte chemische Re-

aktivität von Luftbestandteilen (z. B. bei der Ozonbildung) und sind unter anderem Auslöser für die Freisetzung allergener Pflanzenpollen (LAKE et al. 2017). Ein Anstieg der Außenraumtemperatur führt in vielen Fällen auch zu einer Erhöhung der Gebäudeinnenraumtemperaturen, sodass die Lebensqualität dort ebenfalls eingeschränkt sein kann (KRIESTEN et al. 2023). Insbesondere bei dem neuerlich wieder stärker diskutierten Problem der Innen- bzw. Nachverdichtung von Städten sollten entsprechende thermische und windbeeinflussende Auswirkungen derartiger Maßnahmen bedacht werden.

Stadtentwicklung und -planung stehen vor der Herausforderung, die projizierten Klimaveränderungen in ihrer Stärke abzumildern (Details in VDI 2020). Dazu sollte auf lokaler Ebene auf verschiedene objekt- und flächenbezogene Maßnahmen (KUTTLER 2012, 2013) zurückgegriffen werden, wie an Gebäuden angebrachte Dämmung und Strahlungsschutz sowie dezentrale Regenwasserbewirtschaftung, das Anlegen von schattenspendenden Vegetationsflächen und Luftleitbahnen (PAULEIT et al. 2023).

9 Ausblick

Städte stellen besondere Brennpunkte sowohl in Hinblick auf die Bevölkerungsdichte als auch in Bezug auf einen hohen Energie- und Ressourcenverbrauch dar. Aufgabe der Stadtklimatologie sollte es sein, planungsorientierte und insbesondere quantifizierte Hinweise den kommunalen Entscheidungsträgern zur Verfügung zu stellen, um den projizierten Wirkungen des globalen Klimawandels auf lokaler Ebene möglichst frühzeitig zu begegnen. Langfristig betrifft das nicht nur die Strahlungs- und Wärmeprozesse sowie die bodennahe atmosphärische Austauschdynamik, sondern auch die durch potenziell niedergehende Starkregen verursachte Überschwemmungsgefahr. In Bezug auf kurze Zeitskalen ist darüber hinaus die Vorhersage des Wetters, möglichst auf einzelne Stadtquartiere bezogen, ein anzustrebendes Ziel des präventiven Umweltschutzes.

Tabelle 1-3: Immissionen ausgewählter Luftschadstoffe im Rhein-Ruhr-Gebiet. Stundenmittelwerte in µg m⁻³; (...) = 98 %-Perzentil. Die Daten basieren auf Beobachtungen aus dem Jahre 2020, für PM₁₀ aus 2018 (nach LANUV 2021).

Luftverschmutzung Komponente	Stationstyp		
	Verkehr	Städtischer Hintergrund	Waldgebiet
SO ₂	-	6 (40)	-
NO ₂	26 (64)	19 (54)	4 (17)
NO	12 (68)	6 (60)	0 (1)
O ₃	-	47 (123)	67 (129)
PM ₁₀	29	25	12

Literatur

- BALCHIN, W.G.V., PYE, N., 1947: A micro-climatological investigation of Bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **73**, 297-323.
- BARANKA, G., BOZO, L., CIGLIC, R., KOMAC, B., 2016: Urban heat island gold standard and urban heat island atlas. In: Counteracting urban heat island effects in a global climate change scenario. MUSCO, F. (Hrsg.), *Springer Open*, Chapter 2, 41-70.
- BAUMÜLLER, J., KATZSCHNER, L., 2023: Stadtklima und Klimaanpassung in der städtebaulichen Planung. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 115-123.
- BRANDT, K., 2007: Die ökonomische Bewertung des Stadtklimas am Beispiel der Stadt Essen. *Essener Ökologische Schriften* **25**, Westarp-Wissenschaften, Magdeburg, 112 S.
- BUCHIN, O., HOELSCHER, M.-T., MEIER, F., NEHLS, T., ZIEGLER, F., 2016: Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. *Energy and Buildings* **114**, 27-37.
- CHANGNON, S.A., 1981: METROMEX: A review and summary. *Meteorological Monographs* **18**, 40, 1-15.
- CHRISTEN, A., VOGT, R., 2004: Energy and radiation balance of a Central European City. *International Journal of Climatology* **24**, 1395-1421, doi: 10.1002/joc.1074.
- EMEIS, S., 2023: Lokalklimatische Auswirkungen der urbanen Energieversorgung. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 89-96.
- FOKEN, T., PARLOW, E., GROSS, G., LEITL, B., 2023: Untersuchungsmethoden zum Stadtklima. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 97-114.
- GROSS, G., 2019: On the self-ventilation of an urban heat island. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 87-92.
- GROSS, G., 2021: A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area. *Meteorologische Zeitschrift* **30**, 227-236, doi: 10.1127/metz/2021/1066.
- HUFF, F. A., CHANGNON, S.A., 1973: Precipitation modification by major urban areas. *Bulletin of the American Meteorological Society* **54**, 1220-1232.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PIRANI, A., CONNORS, S.L., PÉAN, C., BERGER, S., CAUD, N., CHEN, Y., GOLDFARB, L., GOMIS, M.I., HUANG, M., LEITZELL, K., LONNOY, E., MATTHEWS, J.B.R., MAYCOCK, T.K., WATERFIELD, T., YELEKÇI, O., YU, R., ZHOU, B. (Hrsg.)]. *Cambridge University Press*.
- KRATZER, P.A., 1956: Das Stadtklima. 2. Auflage. *Vieweg*, Braunschweig, 184 S.
- KRIESTEN, T.F., ZIEMANN, A., SCHÜNEMANN, C., GOLDBERG, V., MODEROW, U., ORTLEPP, R., 2023: Meteorologische Daten zur Bewertung der Wärmebelastung in Gebäuden. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 71-77.
- KÜPPER, M., QUASS, U., JOHN, A.C., KAMINSKI, H., 2018: Contributions of carbonaceous particles from fossil emissions and biomass burning to PM₁₀ in the Ruhr area, Germany. *Atmospheric Environment* **189**, 174-186.
- KUTTLER, W., 2010: Urbanes Klima, Teil 1. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **70**, 329-340.
- KUTTLER, W., 2012: Climate change on the urban scale – Effects and counter-measures in Central Europe. In: Climate Change, Book 1. *InTech Open Access Publisher*, Croatia, doi: 10.5772/50867.
- KUTTLER, W., 2013: Klimatologie. 2. Auflage, UTB 3099. *Ferdinand Schöningh*, 306 S.
- KUTTLER, W., HOLLOSI, B., GUBLER, M., 2023: Stadtklimatologie im Wandel der Zeit – Einblicke aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 125-141.
- KUTTLER, W., MIETHKE, A., DÜTEMAYER, D., BARLAG, A.-B., 2015: Das Klima von Essen / The Climate of Essen. *Westarp Wissenschaften*, Hohenwarsleben, 249 S.
- KUTTLER, W., WEBER, S., 2023: Characteristics and phenomena of the urban climate. *Meteorologische Zeitschrift (early access article)*.
- LAKE, I.R., JONES, N.R., AGNEW, M., 2017: Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environ Health Perspect* **125**, 385-391, doi: 10.1289/EHP173.
- LANDSBERG, H.E., 1981: The Urban Climate. *International Geophysics Series* **28**, Academic Press, New York, 275 S.
- LANUV (= Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, NRW), 2021: Datensammlung Luftreinhaltung. Abruf am 05.04.2023, URL: <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/luft/immissionen/berichte-und-trends/jahreskenngrößen-und-jahresberichte/>.
- LARUELLE, M., ESAU, I., MILES, M., 2019: Arctic cities as an anthropogenic object: a preliminary approach through urban heat islands. *The Polar Journal*, doi: 10.1080/2154896X2019.1685171.
- LIU, J., NIYOGI, D., 2019: Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Scientific Reports* **9**, doi: 10.1038/s41598-019-42494-2.
- LOTTERANER, C., PIRINGER, M., 2016: Mixing-Height Time Series from Operational Ceilometer Aerosol-Layer Heights. *Boundary-Layer Meteorology* **161**, 265-287, doi: 10.1007/s10546-016-0169-2.
- MAHDAVI, A., KIESEL, K., VUCKOVIC, M., 2016: Methodologies for UHI Analysis. In: Counteracting urban heat island effects in a global climate change scenario. MUSCO, F. (Hrsg.), *Springer Open*, Chapter 3, 71-91.
- MATZARAKIS, A., 2023: Hitze in Städten – Quantifizierung, Warnsysteme und Hitzeaktionspläne zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 61-70.
- OKE, T.R., 1997: Urban Environments. In: The Surface Climate of Canada. BAILEY, W.G., OKE, T.R., ROUSE, W.R. (Hrsg.), *Mc Gill-Queens University Press*, Montreal, 303-327.

- OKE, T.R., MILLS, G., CHRISTEN A., VOOGT, J.A., 2017: Urban Climates. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, 525 S.
- PARLOW, E., VOGT R., FEIGENWINTER, C., 2014: The urban heat island of Basel – seen from different perspectives. *DIE ERDE* **145**, 96-110.
- PAULEIT, S., ERLWEIN, S., LINKE, S., RAHMAN, M., ZÖLCH, T., RÖTZNER, T., 2023: Grün-blaue Infrastruktur für die Klimawandelanpassung der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 79-88.
- PIRINGER, M., JOFFRE, S., BAKLANOV, A., CHRISTEN, A., 2007: The surface energy balance and the mixing height in urban areas – activities and recommendations of COST-Action 715. *Boundary-Layer Meteorology* **124**, 3-24, doi: 10.1007/s10546-007-9170-0.
- SAILOR, D.J., GEORGESCU, M., MILNE, J.M., HART, M.A., 2015: Development of a national anthropogenic heating database with an extrapolation for international cities. *Atmospheric Environment* **118**, 7-18.
- SCHERER, D., 2023: Temperatur und Hitze in der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 15-25.
- SCHLÜNZEN, K.H., GRIMMOND S., BAKLANOV A. (Hrsg.), 2022: Guidance on Measuring, Modelling and Monitoring the Canopy Layer Urban Heat Island (CL-UHI). World Meteorological Organization (WMO), Report WMO-No. 1292, Genf.
- SEDLMEIER, K., TINZ, B., 2023: Wind in der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 39-49.
- SHAPIRO, A., FEDOROVICH, E., 2019: An analytical model of an urban heat island circulation in calm conditions. *Environmental Fluid Mechanics* **19**, 111-135, doi: 10.1007/s10652-018-9621-9.
- SICARD, P., AGATHOKLEOUS, E., DE MARCO, A., 2021: Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades. *Environmental Sciences Europe* **33**, doi: 10.1186/s12302-020-00450-2.
- SIMON, H., FALLMANN, J., KROPP, T., TOST, H., BRUSE, M., 2019: Urban Trees and Their Impact on Local Ozone Concentration – A Microclimate Modeling Study. *Atmosphere* **2019**, 10, 154, doi: 10.3390/atmos10030154.
- ULPIANI, G., 2020: On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework, *Science of the Total Environment*, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141727.
- VDI, 2013: VDI 3807 Blatt 1. Verbrauchskennwerte für Gebäude. Grundlagen. *Beuth Verlag*, Berlin, 44 S.
- VDI, 2020: VDI 3787 Blatt 8. Umweltmeteorologie – Stadtentwicklung im Klimawandel. *Beuth Verlag*, Berlin, 84 S.
- WAGNER, P., KUTTLER, W., 2014: Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere – A case-study in Essen, Germany. *Science of The Total Environment* **475**, 104-115.
- WEBER, S., KORDOWSKI, K., 2010: Comparison of atmospheric turbulence characteristics and turbulent fluxes from two urban sites in Essen, Germany. *Theoretical and Applied Climatology* **102**, 61-74.
- WESSOLEK, G., 2001: Bodenüberformung und Versiegelung. Handbuch der Bodenkunde, 11. Erg. Lfg. 04/01, 1-29.
- WINTERRATH, T., JUNGHÄNEL, T., LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WEIGL, E., 2023: Starkregeneignisse im urbanen Raum – Monitoring auf Basis von Messstationen und Wetterradar. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 27-37.
- WURZLER, S., HEBBINGHAUS, H., ROGALLA, L., BECK, N., KLOSTERKÖTHER, A., GEIGER, J., 2023: Entwicklung der Luftqualität in der Metropolregion Rhein-Ruhr. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 51-60.
- ZACHARIAS, S., KOPPE, C., 2015: Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 371161238 UBA-FB-00.
- ZHOU, B., LAUWAET, D., HOOYBERGHS, H., de RIDDER, K., KROPP, J.P., RYBSKI, D., 2016: Assessing Seasonality in the Surface Urban Heat Island of London. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **55**, 493-505, doi: 10.1175/JAMC-D-15-0041.1.
- ZMARSLY, E., KUTTLER, W., PETHE, H., 2007: Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen. Eine Einführung mit Übungen, Aufgaben und Lösungen. *Ulmer*, Stuttgart, 3. Aufl., 182 S.

Kontakt

PROF. DR. WILHELM KUTTLER
 Universität Duisburg-Essen
 Angewandte Klimatologie
 Universitätsstr. 2
 45141 Essen
 wikutt@outlook.de

PROF. DR. GÜNTER GROSS
 Leibniz Universität Hannover
 Institut für Meteorologie und Klimatologie
 Herrenhäuser Straße 2
 30419 Hannover
 gross@meteo.uni-hannover.de

2

D. SCHERER

Temperatur und Hitze in der Stadt

Temperature and heat in the urban environment

Zusammenfassung

Städtische Randbedingungen führen zu Stadt-Umland-Unterschieden der Temperaturen in der Atmosphäre, an der Oberfläche und im Untergrund. Dieser Beitrag strebt eine Präzisierung des städtischen Wärmeinseleffektes an. Die bei Hitzewellen auftretenden Stadteffekte und ihre Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit werden auf gesamtstädtischer Ebene diskutiert und in den Kontext des Klimawandels gestellt. Der Beitrag schließt mit einem kurzen Ausblick auf gesellschaftliche und politische Handlungserfordernisse und verdeutlicht die Bedeutung der Stadtklimaforschung zur Lösung hitzebezogener Probleme.

Summary

Urban boundary layer conditions lead to urban-rural differences in temperature in the atmosphere, at the surface and in the subsurface. This contribution aims at a precise description of urban heat island effects. Urban effects of heat waves and their impact on human health are discussed at city scales and placed in the context of climate change. The paper concludes with a brief outlook on societal and political needs for action and highlights the importance of urban climate research in solving heat-related problems.

1 Einleitung

In diesem Beitrag werden atmosphärische Prozesse genauer beleuchtet, die von städtischen Randbedingungen verändert werden und zu Stadt-Umland-Unterschieden der Temperaturverhältnisse in der Atmosphäre, an der Oberfläche und im Untergrund führen. Diese systematischen Stadteffekte bewirken in Kombination mit weiteren, in den anderen Beiträgen dieses Heftes diskutierten Prozessen spezifische Ausprägungen des Wetters in Städten, was auch als „Stadt Wetter“ bezeichnet wird. Dessen regelmäßig auftretende Besonderheiten führen auf Zeitskalen von Jahrzehnten zu dem, was das Stadtklima auszeichnet.

In Bezug auf die Temperaturverhältnisse in Städten ist das Phänomen der städtischen Wärmeinsel (*Urban Heat Island*, UHI) mittlerweile allgemein bekannt. Leider wird jedoch der Begriff UHI teilweise in unpräziser Weise verwendet. Aus diesem Grund wird im zweiten Abschnitt eine Präzisierung der UHI angestrebt. Der dritte Abschnitt widmet sich der Ausprägung von Hitzewellen in Städten. Die mit Hitzewellen einhergehenden großräumigen, makro- bis mesoskaligen atmosphärischen Prozesse führen, wie allgemein beim Stadt Wetter, zu lokal- bis mikroskaligen Veränderungen der bodennahen atmosphärischen Verhältnisse, die in Abhängigkeit von Intensität und Andauer zu Sachschäden und Beeinträchtigungen der menschlichen

Leistungsfähigkeit und Gesundheit führen können (MATZARAKIS 2023). Die oben genannten Skalen folgen dabei der Terminologie von OKE et al. (2017). Im vierten Abschnitt wird der Zusammenhang zwischen Stadtklima und Klimawandel in Bezug auf Hitze diskutiert. Am Ende des Beitrags wird ein kurzer Ausblick auf gesellschaftliche und politische Handlungserfordernisse gegeben und die Bedeutung der Stadtklimaforschung zur Lösung hitzebezogener Probleme an zwei Beispielen dargestellt.

2 Der städtische Wärmeinseleffekt

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Phänomene dargestellt, die zu einer Überwärmung der Stadt relativ zu ihrem nichturbanen, nahegelegenen Umland führen (KUTTLER und GROSS 2023). Die städtische Überwärmung kann dabei in der bodennahen Luftschicht, das heißt in der Stadthindernisschicht (*Urban Canopy Layer*, UCL), und in der darüber liegenden urbanen Grenzschicht (*Urban Boundary Layer*, UBL) auftreten, aber auch die Oberflächentemperatur T_{surf} (*Surface Temperature*) oder die Temperatur im Untergrund T_{sub} (*Subsurface Temperature*) betreffen. OKE et al. (2017) haben als eindeutige Abkürzungen die vier Terme UHI_{UCL} , UHI_{UBL} , UHI_{surf} und UHI_{sub} eingeführt, die im weiteren Verlauf dieses Beitrags verwendet werden. Jedem dieser vier UHI-Phänomene ist eine Tempe-

raturdifferenz zwischen Stadt und Umland ΔT zugeordnet, welche die jeweilige UHI-Intensität widerspiegelt. Abweichend von OKE et al. (2017) werden hier für die Temperaturdifferenz die gleichen vier Indizes wie bei der jeweiligen UHI verwendet.

In der englischsprachigen Literatur wird für die bodennahe Lufttemperatur oft auch der Begriff *Surface Air Temperature* (SAT) verwendet, wobei zu beachten ist, dass die SAT nicht mit der Oberflächentemperatur T_{surf} verwechselt werden darf, da letztere sich auf die Strahlungsflussdichte bezieht, die eine Oberfläche bei gegebener T_{surf} abstrahlt, wobei auch der Emissionskoeffizient berücksichtigt werden muss.

2.1 Lufttemperatur

Bereits vor rund 200 Jahren stellte HOWARD (1833) fest, dass die in Bodennähe (in der Regel 2 m über Grund) gemessene Lufttemperatur in London höher ist als im nahegelegenen Umland und führte dies auf den Einfluss der Stadt zurück. Seine Erkenntnisse, das heißt die Entdeckung der UHI_{UCL} (der Begriff wurde erst viel später eingeführt; STEWART 2019) und ihrer Verursachung durch städtische Randbedingungen, wurden nachfolgend durch immer genauere und umfassendere Untersuchungen bestätigt. Einen sehr guten Überblick zu dieser Thematik einschließlich eines umfassenden Überblicks über das gesamte Themenfeld und Methodenspektrum der Stadtklimatologie bieten ARNFIELD (2003), OKE et al. (2017) oder MASSON et al. (2020).

In zahlreichen Studien wurden Messungen der bodennahen Lufttemperatur an urbanen und an stadtnahen, nichturbanen Standorten durchgeführt, wobei letztere oft (und teilweise falsch) als rurale Standorte bezeichnet werden. Die Differenz der bodennahen Lufttemperatur zwischen urbanen und nichturbanen Standorten ΔT_{UCL} stellt die Intensität der UHI_{UCL} dar. Dabei ist die Vergleichbarkeit der Studien dadurch eingeschränkt, dass

- die Auswahl urbaner und nichturbaner Standorte unterschiedlich und oft nach rein praktischen Gesichtspunkten erfolgte,
- die Eigenschaften der Standorte und Details der Messungen entweder nicht ausreichend dokumentiert wurden oder für die Untersuchung von Stadt-Umland-Unterschieden nicht hinreichend geeignet waren,
- die Messungen nur kurzzeitig erfolgten oder längere Datenlücken aufweisen,
- die Berechnung der ΔT_{UCL} auf unterschiedliche Weise erfolgte (über einzelne Stationspaare oder über Mittelwerte für urbane und nichturbane Standorte) und
- der Begriff der Intensität der UHI_{UCL} in unterschiedlicher Weise definiert wird.

Letzteres ist bis heute Anlass für Diskussionen. So wird die Intensität der UHI_{UCL} in manchen Studien über den räumlichen Mittelwert der ΔT_{UCL} definiert, während in anderen

Studien dazu das Maximum der ΔT_{UCL} , also die Differenz zwischen dem wärmsten urbanen und dem kältesten nichturbanen Standort, verwendet wird. Weiterhin wird manchmal die Intensität der UHI_{UCL} nur auf Tagesbasis angegeben und dann entweder als Tagesmittel oder als Tagesmaximum der ΔT_{UCL} .

Um die Vergleichbarkeit von Studien zur UHI_{UCL} zu verbessern, haben STEWART und OKE (2012) das Konzept der *Local Climate Zones* (LCZ) eingeführt. Dabei stand ursprünglich im Vordergrund, eine strukturierte und standardisierte Beschreibung der Landbedeckung, der Landnutzung und der Bebauungsstruktur im Umfeld eines Messstandortes zu ermöglichen. Mittlerweile wird das LCZ-Konzept zunehmend auch verwendet, um daraus lokalklimatische Effekte abzuleiten, die für eine LCZ charakteristisch sein sollten. Dabei wird manchmal übersehen, dass

- die Varianz der Strukturgrößen (Gebäudehöhe, Bebauungsdichte, Vegetationstypen und -anteile etc.), die zur Definition einer LCZ verwendet werden, erheblich sein kann, weshalb auch die aus den stadtmorphometrischen Größen abgeleiteten atmosphärischen Parameter (aerodynamische Rauigkeitslänge, Himmelsichtfaktor, thermodynamische Parameter etc.) keine vergleichbaren eindeutigen Werte besitzen,
- innerhalb einer LCZ eine Vielzahl mikroskaliger Prozesse stattfinden (FENNER et al. 2017),
- die Lage einer LCZ innerhalb einer Stadt zu mesoskalig bedingten Unterschieden (z. B. Standortlage im Vergleich zu einer innerstädtischen Lage) führen kann (FENNER et al. 2014) und
- die LCZ nur bedingt auf europäische Städte anwendbar sind und das seit langem etablierte System der Klimatope nach VDI (2015) bzw. darauf aufbauende Ergänzungen wichtige zusätzliche Informationen liefern (WICKI und PARLOW 2017, YIN et al. 2022).

Ungeachtet dieser methodischen Probleme gibt es mittlerweile aus vielen Studien gesicherte Erkenntnisse zur UHI_{UCL} . In den meisten Städten der mittleren und höheren Breiten gibt es sowohl einen Jahres- als auch einen Tagesgang der ΔT_{UCL} . Die Werte sind vor allem in den Abend- und Nachtstunden höher als am Tag, wenn oft nur geringfügig positive oder sogar negative Werte (*Urban Cool Island*) auftreten. Dieser Tagesgang ist in Deutschland häufig im Sommerhalbjahr verstärkt, während im Winterhalbjahr die ΔT_{UCL} teilweise ganzjährig positiv, aber schwächer als die maximalen Werte der ΔT_{UCL} in Sommernächten ist.

Es gibt aber auch Städte, die ein anderes Muster des Jahresgangs aufweisen. In Seoul, Republik Korea, ist die UHI_{UCL} in den Herbst- und Wintermonaten häufig stärker ausgeprägt als in den anderen Monaten (KIM und BAIK 2002), was auf die regionalen Klimabedingungen zurückzuführen ist. Abbildung 2-1 zeigt, dass auch in Seoul die UHI_{UCL} vorwiegend nachts ausgebildet ist, aber ΔT_{UCL} im Sommer ihr saisonales Minimum aufweist. JAUREGUI et al. (1992)

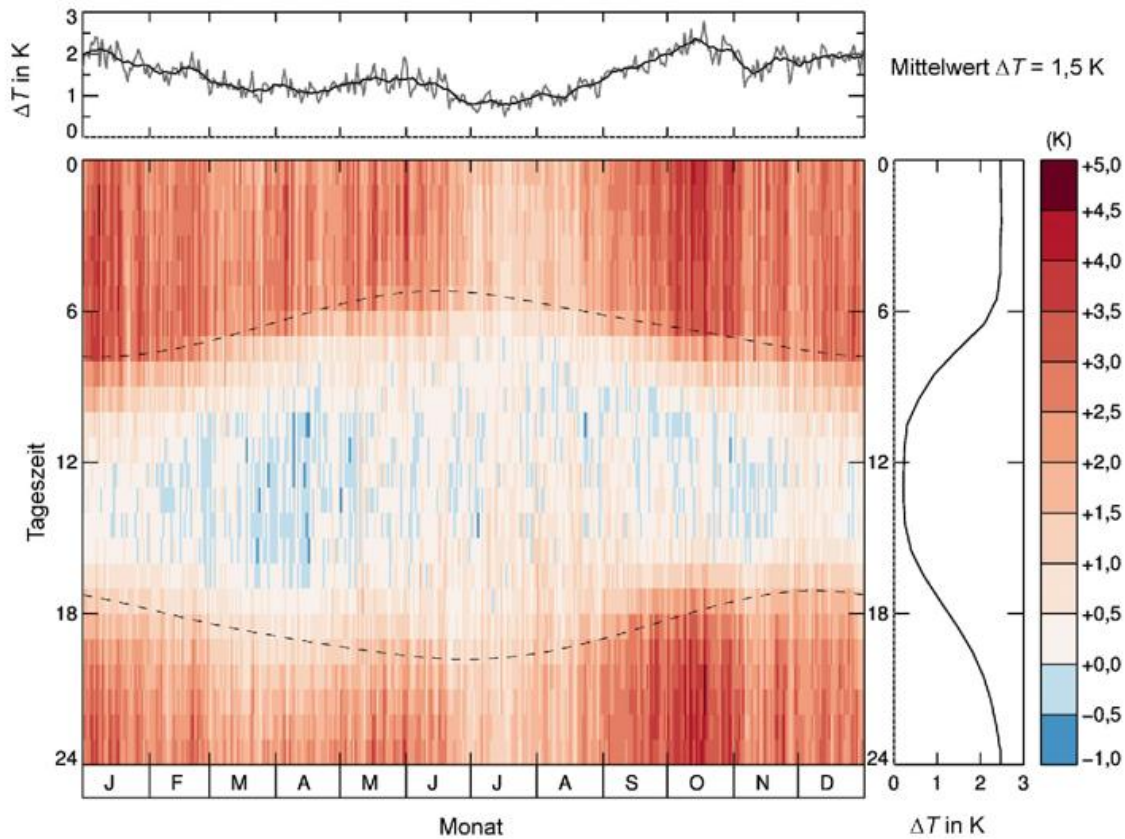


Abbildung 2-1: Tages- und Jahresgang der Differenz der bodennahen Lufttemperatur an der urbanen Station Gangnam und der suburbanen Station Uijeongbu in Seoul, Republik Korea, gemittelt über den Zeitraum von 2000 bis 2014. Die gestrichelten Linien markieren den Zeitpunkt von Sonnenauf- und -untergang (Grafik: Achim Holtmann).

zeigten für Guadalajara, Mexiko, dass die UHI_{UCL} während der Trockenzeit ein saisonales Maximum erreicht. Diese Beispiele belegen, dass lokal- und mesoskalige Stadtklimaeffekte nicht unabhängig von den übergeordneten regionalen Klimabedingungen auftreten. Hierbei spielen jahreszeitliche Unterschiede in der Advektion von Luftmassen, die Bodenfeuchte und die damit verbundene Evapotranspiration und der Vegetationszustand eine wichtige, regional spezifische Rolle.

Viele Untersuchungen haben sich der Frage gewidmet, auf welche Ursachen die beobachteten Jahres- und Tagesgänge der ΔT_{UCL} zurückzuführen sind. Nach derzeitigem Kenntnisstand gibt es eine Vielzahl von Ursachen, die, je nach Stadt, in unterschiedlicher Stärke vorhanden sind.

Der veränderte kurz- und langwellige Strahlungshaushalt in Vegetationsbeständen und in der *Urban Canopy Layer* führt einerseits zu Schatteneffekten und andererseits dazu, dass ein Teil der Strahlung in den Straßenschluchten und Innenhöfen nach mehrfacher Reflexion verstärkt absorbiert wird. Letzteres führt unter anderem dazu, dass in dicht bebauten Gebieten die Albedo niedriger ist als in locker bebauten Gebieten, obwohl die Albedowerte der einzelnen Oberflächen sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Im Endeffekt wird dabei der mikroskalige Strahlungshaushalt modifiziert, wobei der lokalskalige Effekt auf die Strahlungsbilanz eines Gebietes durch gegenläufige, kompensatorische Effekte gering ist (PARLOW 2021).

In bebauten Gebieten ist die mit der Luft im Austausch stehende Oberfläche durch Wand- und Dachflächen erhöht. Das Verhältnis der gesamten Oberfläche zur Grundfläche eines Gebiets wird als *Complete Aspect Ratio* λ_c bezeichnet (λ_c besitzt für unbebaute Gebiete den Wert 1). CHRISTEN und VOGT (2004) konnten am Beispiel von Messungen an unterschiedlichen Standorten in Basel, Schweiz, zeigen, dass der fühlbare Wärmestrom in Zusammenhang mit λ_c steht. VOOGT und GRIMMOND (2000) nutzten diesen Zusammenhang, um den fühlbaren Wärmestrom in unterschiedlichen Stadtgebieten zu modellieren.

Der Eintrag von Abwärme, also von Wärme, die von Gebäuden, Fahrzeugen, Gewerbe- und Industrieanlagen und in sehr geringem Umfang direkt von Menschen und Tieren in die Atmosphäre eingetragen wird, ist in Städten deutlich erhöht und trägt ebenfalls zur Ausbildung einer UHI_{UCL} bei.

Eine weitere Ursache der UHI_{UCL} besteht in der tagsüber im Vergleich zu unversiegelten bzw. unbebauten Flächen großen Wärmespeicherung städtischer Gebiete. Das wirkt sich auf den fühlbaren Wärmestrom aus, der tagsüber durch den hohen Speicheranteil begrenzt wird und somit die Erwärmung der Luft trotz hoher Oberflächentemperaturen ebenfalls begrenzt ist. In der Nacht steht aber die am Tage in den Straßen, Wänden und Dächern gespeicherte Wärme zur Verfügung, um langwellige Strahlungsverluste teilweise oder gar vollständig auszugleichen. Dieser Effekt führt dazu, dass der fühlbare Wärmestrom in dicht bebauten Ge-

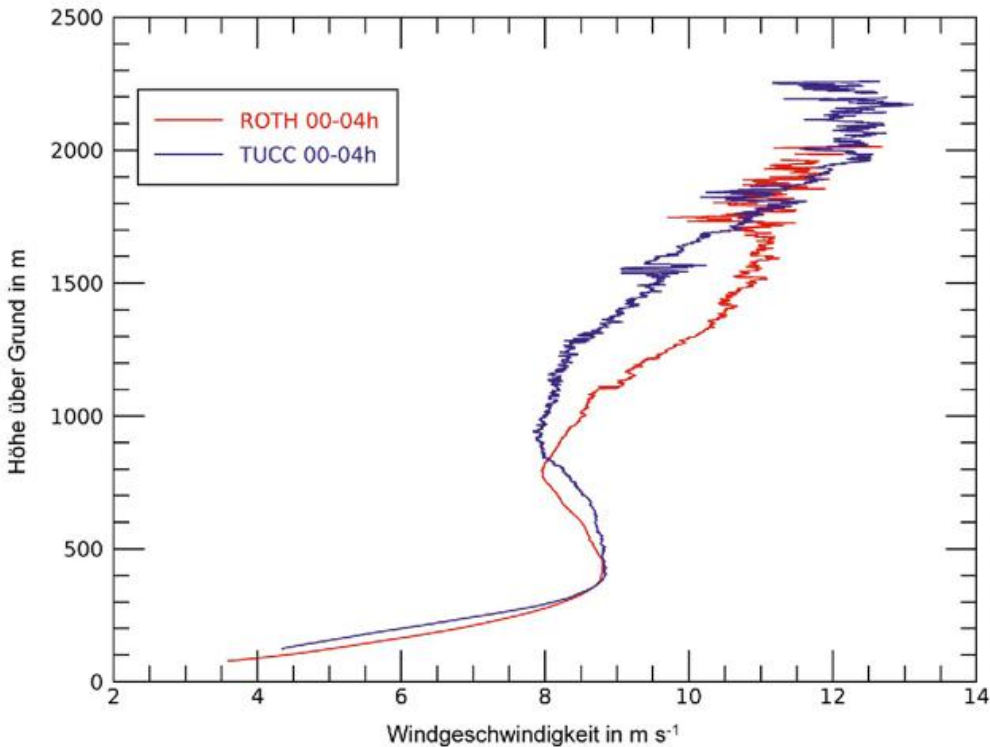


Abbildung 2-2: Mittleres vertikales Windprofil an den ca. 6,4 km voneinander entfernten Standorten Rothenburgstraße (ROTH) und Campus Charlottenburg der Technischen Universität Berlin (TUCC) des Stadtklima-Observatoriums Berlin (*Urban Climate Observatory*, UCO); gemessen mit zwei Wind-LIDAR-Systemen am 07.05.2019 im Zeitraum von 0 bis 4 Uhr MEZ. Der *Nocturnal Jet* ist durch die in ca. 400 m Höhe über Grund auftretenden Windmaxima erkennbar (Grafik: Fred Meier).

bieten auch nachts nur selten in Richtung der Erdoberfläche zeigt. Es findet dort daher lokalskalig keine nächtliche Kaltluftbildung statt, da die Luft keine Energie abgeben muss, sondern teilweise sogar weiterhin von den städtischen Oberflächen Energie über fühlbare Wärme zugeführt bekommt. Somit bleibt die bodennahe Luft über bebauten Flächen auch nachts häufig neutral bis schwach labil geschichtet.

Da sich aber die Luft auch in bebauten Gebieten im Laufe der Nacht abkühlt, muss die Abkühlung entweder durch horizontale Kaltlufttransporte oder durch vertikales Herabmischen kühlerer Luft erfolgen. Kaltluft wird bei wind-schwachen Wetterlagen über Gelände mit geringen Höhenunterschieden aber nur über kurze Distanzen von wenigen hundert Metern von den Entstehungsorten (z. B. Parks) in die angrenzenden, dicht bebauten Gebiete transportiert. Dies erfordert zudem, dass Kaltluftströme nur in geringem Umfang durch höhere Vegetation oder höhere Gebäude abgeschwächt werden. Vertikales Herabmischen von kühlerer Luft kann aber auch dann erfolgen, wenn Rauigkeitselemente wie Bäume oder Gebäude flache Kaltluftströmungen behindern würden. Im Gegenteil, die von diesen Rauigkeitselementen verursachte Turbulenz verstärkt sogar das vertikale Herabmischen, was aber voraussetzt, dass sich kühlere, entropieärmere Luft über den Gebäuden befindet und das Windfeld über den Dächern auch stark genug ist, um mechanische Turbulenz zu erzeugen. Auch über Städten ohne ausgeprägtes Relief bilden sich häufig nächtliche Windmaxima (sogenannte *Nocturnal Jets*) in geringer

Höhe aus, weshalb diese auch als *Low-Level Jets* bezeichnet werden. Abbildung 2-2 verdeutlicht am Beispiel zweier Standorte in Berlin, die 6,4 km voneinander entfernt sind, dass *Nocturnal Jets* ein mesoskaliges Phänomen darstellen und für größere Stadtquartiere die für die Ausbildung nächtlicher mechanischer Turbulenz erforderliche kinetische Energie liefern können. Viele Untersuchungen zeigten, dass ΔT_{UCL} mit zunehmender Windgeschwindigkeit abnimmt, was auf verstärkte mechanische Turbulenz und damit einhergehender Durchmischung der bodennahen Luftschichten bei höheren Windgeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Insofern ist die derzeitige, in der Stadtplanung bei Untersuchungen zu Klima oder Luftbelastung weitverbreitete Fokussierung auf die UCL nicht sachge-

mäß. Vielmehr sollte die gesamte Rauigkeitsschicht sowie die darüber liegende Inertialschicht (sofern vorhanden) in Bezug auf die Durchlüftung und ihrer Begleiterscheinungen untersucht werden, was aber andere Messverfahren (z. B. bodengestützte Fernerkundungsverfahren) und numerische Modelle, welche die Grobstruktur der Turbulenz explizit auflösen (*Large Eddy Simulation*, LES), erforderlich machen (FOKEN et al. 2023).

In Abbildung 2-3 ist eine LES-Modellierung mit PALM-4U (siehe Abschnitt 5) des an die rund 300 ha große Berliner Grünfläche des Tempelhofer Feldes angrenzenden Quartiers des Schillerkiezes dargestellt. Die ausgewählte Wetterlage stellt eine Idealisierung der an diesem Tag vorherrschenden realen Wetterlage dar, die nachts entlang des dargestellten Querschnitts zu einer schwachen bodennahen Strömung aus Osten führte (der Mittelwert der Windgeschwindigkeit betrug zu dieser Zeit 0,4 m/s). Während sich die kälteste Luft in unmittelbarer Bodennähe über dem Tempelhofer Feld befindet und durch die Bebauung am Westrand des Schillerkiezes am Eindringen in den Siedlungsraum gehindert wird, kommt es dennoch auch im bebauten Gebiet zu einer Abkühlung (Abb. 2-3 oben). Diese erfolgt über den Freiflächen durch Abkühlung sowie durch Einmischung von Kaltluft gegen die mittlere Strömung durch Turbulenz in der Rauigkeitsschicht (Abb. 2-3 unten).

Oft wird die Bevölkerung oder die Einwohnerdichte einer Stadt für die Abschätzung der maximalen Intensität der UHI_{UCL} herangezogen. OKE (1981) wies einen linearen Zu-

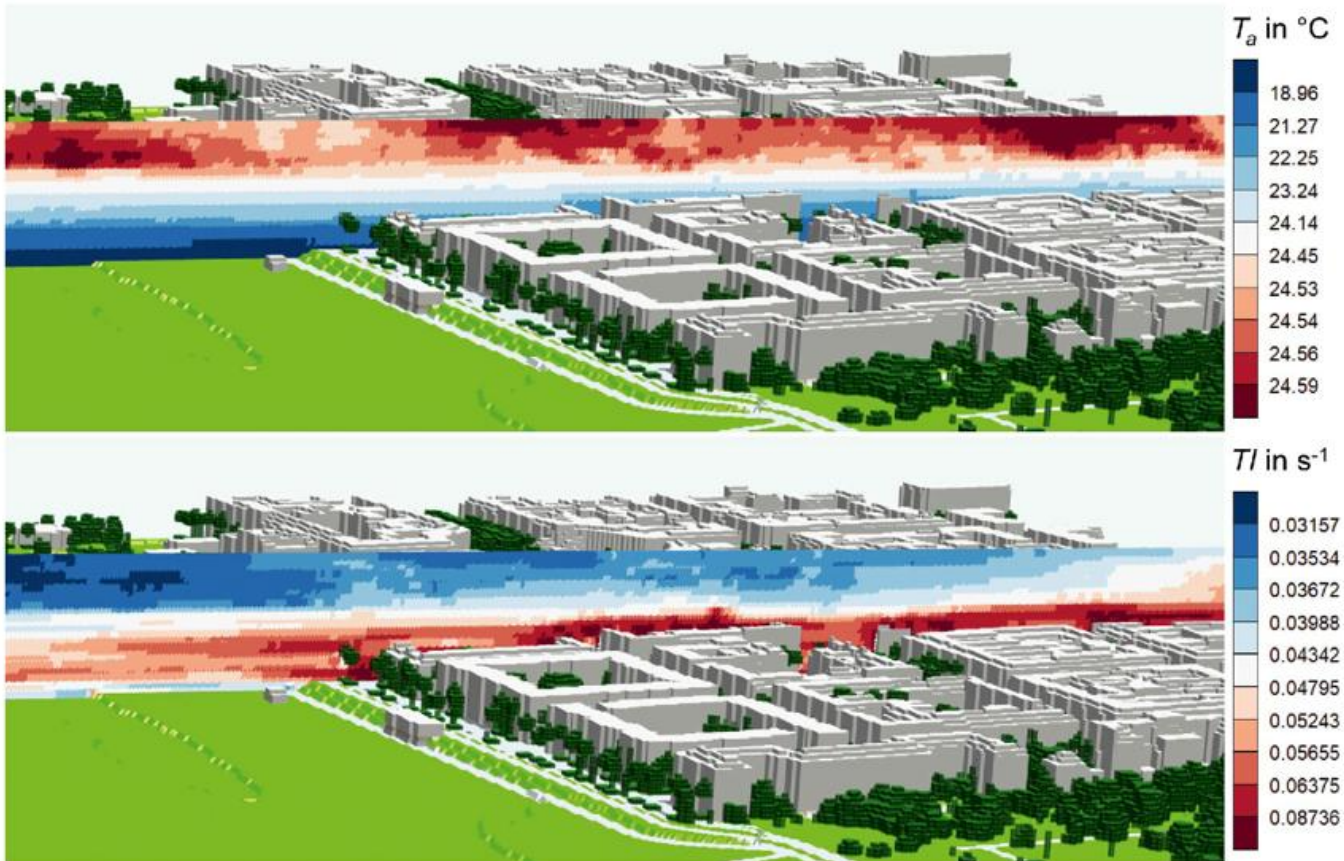


Abbildung 2-3: Mittlere vertikale Verteilung der Lufttemperatur T_a (oben) und der Turbulenzintensität TI (unten) in der bodennahen Luftschicht entlang eines Transekts vom Tempelhofer Feld in das Quartier des Schillerkiezes in Berlin im Zeitraum vom 16.07.2018 19:00 Uhr bis zum 16.07.2018 05:00 Uhr UTC, simuliert mit PALM-4U für eine idealisierte Wetterlage. TI wird von PALM-4U über den Absolutbetrag der Rotation des dreidimensionalen Windfeldes berechnet (Grafik: Dieter Scherer).

sammenhang zwischen dem Himmelssichtfaktor (*Sky View Factor*, SVF) und dem Maximum der ΔT_{UCL} nach. Das Höhen-Breiten-Verhältnis von Straßenschluchten H/W (*Canyon Aspect Ratio*) hat ebenfalls einen starken, aber nichtlinearen Einfluss auf das Maximum der ΔT_{UCL} (OKE 1987). Mit zunehmendem Wert von H/W erfolgt zunächst ein starker Anstieg der maximalen Intensität der UHI_{UCL} , der dann aber bei größeren H/W -Werten über 1 abflacht. Bei einem SVF von ca. 0,3 bzw. einem H/W von 3 wird der Höchstwert des Maximums der ΔT_{UCL} erreicht, der bei ca. 12 K liegt und offensichtlich physikalisch limitiert ist (OKE et al. 2017).

Die UHI_{UBL} ist im Vergleich zur UHI_{UCL} schlechter untersucht, da Messungen in der *Urban Boundary Layer* wesentlich aufwändiger sind als in Bodennähe. Grundsätzlich folgt die Intensität der UHI_{UCL} an der Untergrenze der UBL dem Verlauf der Intensität der UHI_{UCL} , aber in abgeschwächter Weise. Mit zunehmender Höhe schwächt sich die UHI_{UBL} ab und verschwindet am Oberrand der UBL. Über Städten ist die Mischungsschicht (*Mixed Layer*) bei windschwachem Wetter bis zu 20 % höher als im Umland und bleibt auch nachts mit geringer Mächtigkeit bestehen, während sie im Umland zu dieser Zeit verschwindet.

Wie nachfolgend genauer erläutert wird, verstärkt die UHI_{UCL} hitzebezogene Probleme in Städten. Es gibt aber

auch positive Effekte der UHI_{UCL} wie einen geringeren Energieverbrauch für die Raumwärmeerzeugung im Winterhalbjahr oder angenehmere Witterungsbedingungen in den Übergangsjahreszeiten.

2.2 Oberflächentemperatur

Zur Unterscheidung der Differenz der Oberflächentemperatur zwischen urbanen und nichturbanen Oberflächen von der Differenz der Lufttemperatur wurde der Begriff *Städtische Oberflächenwärmeinsel* (*Surface Urban Heat Island*, UHI_{surf}) und die dazu gehörende Intensitätsgröße ΔT_{surf} eingeführt. Die Oberflächentemperatur T_{surf} ist grundsätzlich eine flächendeckend und räumlich verteilt messbare Größe, die aus Daten von flugzeug- oder satellitengestützten Thermal-Infrarot-Radiometern abgeleitet werden kann, wobei hierzu aber auch die Emissionskoeffizienten der einzelnen Oberflächenelemente (Pixel) bekannt sein müssen, da ansonsten nur Unterschiede der Strahlungstemperatur detektiert würden und somit keine Aussagen zur UHI_{surf} möglich wären (VOOGT und OKE 2003). Je nach räumlicher und zeitlicher Auflösung des Messsystems und der Daten zu den Emissionskoeffizienten können differenzierte Aussagen zur ΔT_{surf} abgeleitet werden. Problematisch ist hierbei das Vorhandensein von Wolken, welche die Messung der T_{surf} beeinträchtigen und somit die Verfügbarkeit von Daten reduzieren. Es gibt aber die Möglichkeit, mit

Radiometer-Messungen mikroskalige kontinuierliche Zeitreihen der ΔT_{surf} zu gewinnen (ALLEN et al. 2018).

Bei vielen Untersuchungen zur ΔT_{surf} zeigte sich, dass versiegelte und überbaute Flächen tagsüber wesentlich wärmer sind als Gewässer und unversiegelte Flächen. Oft betragen die Werte der ΔT_{surf} tagsüber mehr als 20 K. Nachts hingegen sind die Werte betragsmäßig kleiner (in der Größenordnung von wenigen K). Gewässer sind in Nachtaufnahmen deutlich erkennbar, da sie generell wärmer als unversiegelte Flächen sind und daher im Sommer kaum beziehungsweise gar nicht zur Kaltluftbildung beitragen. Generell folgen die Muster der ΔT_{surf} nachts denen der ΔT_{UCL} , während tagsüber die räumlichen Unterschiede der Oberflächentemperatur nicht mit denen der Lufttemperatur korrelieren, da der Wärmehaushalt aus den zuvor genannten Gründen bei versiegelten und bebauten Flächen stark verändert ist. Je höher die T_{surf} einer Oberfläche ist, desto stärker ist die langwellige Ausstrahlung, was die verfügbare Energie reduziert. Aus einer hohen Oberflächentemperatur kann somit nicht automatisch auf einen hohen, in die Atmosphäre gerichteten fühlbaren Wärmestrom geschlossen werden (PARLOW 2003, 2021). Es kommt in Städten sogar vor, dass der fühlbare Wärmestrom tagsüber kleiner ist als in unbebauten Gebieten des Umlands, was zur Bildung einer *Urban Cool Island* führt. Dies erfolgt, wenn die Wärmespeicherung in Wänden und Dächern so groß ist, dass der Eintrag fühlbarer Wärme in die Luft reduziert wird.

2.3 Temperaturen im Untergrund

In Städten wurde nachgewiesen, dass die Bodentemperatur und die Temperatur des Grundwassers höher sein können als im Umland (BÖTTCHER und ZOSSEDER 2022), es also zur Bildung einer UHI_{sub} kommt. Auch hier spielt der veränderte städtische Wärmehaushalt eine zentrale Rolle. Der im Vergleich zum Umland erhöhte Speicherwärmestrom sowie insbesondere der zusätzliche Eintrag von Abwärme in den Untergrund führen zu einer zeitlich phasenverschobenen Erhöhung der Temperatur im Untergrund. Mit zunehmender Tiefe schwächt sich die Amplitude der an der Oberfläche vorhandenen, in der Stadt veränderten Temperaturwelle ab. Es stellt sich eine substratabhängige und von der Periodizität der Temperaturwelle gesteuerte Eindringtiefe der Temperaturwelle ein. Dabei dringt die jährliche Temperaturwelle ca. 10- bis 20-mal tiefer in den Untergrund ein als die Tageswelle. Unterhalb der Eindringtiefe der Jahreswelle pendelt sich die Temperatur des Untergrundes ungefähr auf die langfristige Jahresmitteltemperatur der bodennahen Lufttemperatur ein, was in Stadtregionen dazu führt, dass die UHI_{sub} näherungsweise die UHI_{UCL} abbildet. In größerer Tiefe ist das Vertikalprofil der Temperatur dann im Wesentlichen durch den geothermalen Wärmefluss gesteuert.

Unberücksichtigt ist hier die Advektion von Wärme durch Grundwasserströme und der Eintrag von Wärme über Regen und Abwasser, die weitere, aber schwierig quantifizierbare Ursachen der UHI_{sub} darstellen.

3 Hitzewellen in Städten

Städte sind, wie ihr Umland, von Episoden mit erhöhten Lufttemperaturen betroffen, die einige Tage bis zu wenigen Wochen andauern können und bei entsprechender Intensität und Andauer zu Sachschäden und gesundheitlichen Belastungen führen können (MATZARAKIS 2023). Für vulnerable Personen, das heißt Menschen, deren Fitness oder Gesundheit eingeschränkt ist und diese der Hitze exponiert sind, kann dies im Extremfall zum Tod führen. Für diese als Hitzewellen bezeichneten Episoden gibt es keine einheitliche Definition (FENNER et al. 2019a), was Vergleiche unterschiedlicher Studien erschwert.

Einige Untersuchungen haben sich mit der Frage befasst, ob regional erhöhte Lufttemperaturen mit der UHI_{UCL} interagieren, das heißt Hitzewellen zu einer Erhöhung oder Absenkung der ΔT_{UCL} führen. Dabei wurden gegenläufige Ergebnisse berichtet (eine Übersicht findet sich bei FENNER et al. 2019b). Diese scheinbar widersprüchlichen Aussagen erklären sich aber vermutlich durch die jeweiligen Wetterbedingungen, die mit erhöhten Lufttemperaturen einhergehen. Im Umland werden höhere nächtliche Lufttemperaturen häufig dann gemessen, wenn Bewölkung langwellige Ausstrahlungsverluste und somit die Bildung von Kaltluft begrenzt. Daher spielt es eine große Rolle, wann (tags oder nachts) und wo (Stadt oder Umland) die Messung stattfand, mit welcher eine erhöhte Lufttemperatur festgestellt wurde (FENNER et al. 2019b). Dieses Ergebnis zeigt, wie wichtig die Dokumentation methodischer Details bei der Untersuchung von Extremwetterlagen sind.

FENNER et al. (2019b) belegen, dass die Tagesmaxima der Lufttemperatur in der Stadt und im Umland bei Hitzewellen vergleichbar hohe Werte annehmen. Daher sind Tagesmaxima der Lufttemperatur bei der Frage, ob Städte im Vergleich zu ihrem Umland ein erhöhtes Hitzestressrisiko besitzen, als Prädiktor in Risikomodellen nur schlecht geeignet (SCHERER et al. 2013). Leider wird diese Tatsache in Praxisanwendungen der Stadtplanung und in Studien zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels oft ignoriert. Viele Studien nutzen beispielsweise die Anzahl heißer Tage (das Tagesmaximum der Lufttemperatur beträgt mindestens 30 °C) als Indikator für räumliche Muster der Hitzestressgefährdung, obwohl sich diese Größe zwischen Stadt und Umland oft nur geringfügig unterscheidet.

Da die UHI_{UCL} vor allem nachts ausgeprägt ist und sich verstärkt, wenn in der Stadt erhöhte Lufttemperaturen herrschen (FENNER et al. 2019b), sind Tagesminima der Lufttemperatur und davon abgeleitete Tropennächte (das Tagesminimum der Lufttemperatur beträgt mindestens 20 °C) als Prädiktor in Risikomodellen oft besser geeignet (SCHERER et al. 2013).

Interessanterweise zeigen FENNER et al. (2019a), dass die mittlere Differenz des Tagesmittels der Lufttemperatur in den Monaten Mai bis September im Zeitraum von 1948 bis 2017 zwischen der DWD-Station Berlin-Tempelhof und der

ca. 30 km entfernten DWD-Station Potsdam 0,7 K beträgt, während die Tagesmaxima und Tagesminima nur eine mittlere Differenz von 0,2 K bzw. 0,3 K aufweisen. Dies bedeutet, dass Tagesmittelwerte am besten als Prädiktor für Hitzestress-Risikomodelle geeignet sind, was die Untersuchungen von SCHERER et al. (2013) für Berlin nachgewiesen haben.

Darüber hinaus konnten KRUG et al. (2020) für acht deutsche Großstädte zeigen, dass während Hitzewellen teilweise auch erhöhte bodennahe Ozonkonzentrationen auftreten, die das Mortalitätsrisiko mitbeeinflussen. Dieser Effekt kann nur partiell von der Hitzewirkung getrennt werden, was darauf hinweist, dass Hitze oft nur einen indirekten Einfluss auf die menschliche Gesundheit besitzt und andere zusätzliche Belastungen (z. B. Primärerkrankungen) eine wesentliche Rolle spielen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine erhöhte Hitzestress-Gefährdung nicht zwangsläufig zu einem Anstieg von Hitzestress-Risiken führt, da die von einer Gefährdung (*Hazard*) ausgehende Schädigung (*Adverse Effect*), die das Risiko (*Risk*) definiert, auch von der Exposition (*Exposure*) und der Vulnerabilität (*Vulnerability*) der betroffenen Objekte oder Personen abhängt. In einer Stadt sind eine sehr große Zahl von Menschen von Hitze betroffen, allerdings in sehr unterschiedlichen Lebenssituationen, die zu einer großen, nicht quantifizierbaren Bandbreite an individueller Exposition und Vulnerabilität führt. Insofern stellt sich die Frage, ob human-biometeorologische Indexgrößen für gesamtstädtische Betrachtungen überhaupt geeignet sind. Diese haben zwar den Vorteil, die physikalischen und physiologischen Gegebenheiten von Menschen unter dem Einfluss von Lufttemperatur, kurz- und langwelliger Strahlung, Luftfeuchte und Wind abzubilden, allerdings auch nur für normierte Bedingungen, sobald Personenkollektive betrachtet werden sollen. Oft sind einfachere, für Atmosphärenmodelle generell gut berechenbare Indexgrößen wie das Tagesmittel der Lufttemperatur auf städtischen Skalen für die Abschätzung von hitzebezogenen Wirkungen ausreichend, zumal komplexere Indexgrößen oft mit der Lufttemperatur korrelieren und somit in empirisch-statistischen Wirkmodellen zu ähnlichen oder gar niedrigeren Varianzerklärungen führen.

4 Klimawandel und Hitze in Städten

Der globale Klimawandel hat in den letzten Jahrzehnten zu einem generellen Anstieg der bodennahen Lufttemperatur geführt. Dieses konnte auch in Städten beobachtet werden (IPCC 2021). Zahlreiche Arbeiten haben sich mit der Frage befasst, welchen Beitrag Städte durch anthropogene Emissionen von Treibhausgasen zum globalen Klimawandel leisten und wie sich ansteigende Lufttemperaturen auf Städte und ihre Bevölkerung auswirken (McCARTHY et al. 2010, OKE et al. 2017, MASSON et al. 2020, IPCC 2021) und Anpassungsmaßnahmen erfordern. Dabei kommt insbesondere Extremereignissen wie Hitzewellen in Städten

eine besondere Bedeutung zu, da die UHI_{UCL} in heißen Nächten eine Zusatzbelastung bewirkt.

Dabei muss aber beachtet werden, dass

- a) Klimavariabilität auf unterschiedlichen Zeitskalen Klimawandeltrends überlagert,
- b) die Datenlage in Bezug auf stadtauflösende Wetterbeobachtungen in vielen Städten leider weltweit generell sehr dürftig ist (MULLER et al. 2013) und daher die Validierung von Klimasimulationen und daran gekoppelten Wirkmodellen für Städte schwierig ist,
- c) die Analyse von Extremereignissen möglichst lange Zeitreihen erfordert,
- d) die langfristige Vorhersagbarkeit des Klimas auf Zeitskalen von Jahrzehnten oder länger nicht zuletzt durch sogenannte „Tiefe Unsicherheit“ (*Deep Uncertainty*) prinzipiell unmöglich ist und somit nur Klimaprojektionen berechnet werden können.

Ungeachtet dessen ist durch zahlreiche Messungen gesichert, dass Urbanisierung zu einer Verstärkung der UHI_{UCL} führt. Urbanisierung bezeichnet das Bevölkerungswachstum beziehungsweise das Verdichten von Stadtregionen und verstärkt die UHI_{UCL} gemäß OKE (1981, 1987) unabhängig vom Klimawandel. Da sich Urbanisierungstrends und klimawandelbedingte Trends der bodennahen Lufttemperatur überlagern, ist es bis heute schwierig, diese beiden Effekte in Stadtregionen voneinander zu trennen. Ebenfalls nachgewiesen ist durch umfassende, koordiniert durchgeführte globale (*Coupled Model Intercomparison Project CMIP*; EYRING et al. 2016) und regionale (*EUROCORDEX*; JACOB et al. 2014) Klimaprojektionsläufe für das 21. Jahrhundert auf der Basis unterschiedlicher Szenarien der gesellschaftlichen Entwicklung und der damit verbundenen Strahlungsantriebe (*Radiative Forcing*), dass die Entwicklung zu ansteigenden Lufttemperaturen auch die kommenden Jahrzehnte weitergehen wird, selbst wenn Klimavariabilität vorübergehend den Trend maskieren könnte.

Der globale Klimawandel hat in vielen Regionen bereits zu einer Zunahme von Tagen mit Hitzewellen geführt. FENNER et al. (2019a) wiesen am Beispiel langer Beobachtungsreihen aus Berlin (1948-2017) und Potsdam (1893-2017) nach, dass Trends zu Hitzewellen-bezogenen Größen (Anzahl, Andauer, Intensität) von der jeweiligen Definition einer Hitzewelle abhängen, was zudem Vergleiche zwischen unterschiedlichen Regionen erschwert. Sie konnten ebenfalls zeigen, dass Berlin als Großstadt aufgrund der UHI_{UCL} deutlich stärker von Hitzewellen betroffen ist als der Umlandstandort Potsdam.

Es gibt jedoch noch immer offene Fragen zu den Auswirkungen des globalen Klimawandels auf Städte in unterschiedlichen Regionen der Erde, die weitere Untersuchungen erfordern. So ist noch nicht abschließend geklärt, wie Hitzewellen mit der UHI_{UCL} interagieren (FENNER et al. 2019b), ob und wie stark sich in Städten Lag- und Hysterese-Effekte bei Hitzewellen bemerkbar machen oder ob es

in Städten eine Zunahme kombinierter Effekte (*Compound Events*) gibt, zum Beispiel Dürren und Hitze, Luftbelastung und Hitze. Städte weisen eine große Vielfalt an Mikroklimaten auf, nicht zuletzt, weil Stadtvegetation klimaregulierende Ökosystemleistungen erbringt. Ob und in welchem Umfang diese auch unter zukünftigen Klimabedingungen erhalten bleiben, ist eine wichtige Frage, auch in Bezug auf die Entwicklung und Implementierung effektiver Maßnahmen zur Reduzierung hitzebezogener Risiken. So benötigt Stadtvegetation eine ausreichende Versorgung mit Wasser, um über Transpiration Kühlung klimaregulierend wirken zu können. Während Trockenperioden kann es aber vorkommen, dass nur noch der Schattenwurf von Stadtbäumen eine Reduzierung der Hitzebelastung bewirken kann. Daher muss sowohl unter gegenwärtigen als auch unter zukünftigen Klimabedingungen die Sicherstellung der Wasserversorgung von Stadtvegetation eine wichtige Maßnahme bilden.

5 Ausblick

Aus den oben genannten Gründen sind Städte buchstäblich Hot Spots sowohl in Bezug auf gegenwärtige als auch zukünftige Probleme mit Hitze. Es gibt inzwischen eine fast unüberschaubare Anzahl von Untersuchungen, welche sich mit Maßnahmen zur Reduzierung hitzebezogener Risiken befassen. Das gilt zum einen für städtische Außenräume, in denen tagsüber an heißen Tagen Schatten durch Gebäude, Stadtbäume oder andere Infrastrukturen eine besonders wichtige Rolle spielen. Aber auch in Innenräumen sind durch Maßnahmen an Gebäuden und im nahen Umfeld sehr viele Handlungsoptionen verfügbar, um hitzebedingte Schädigungen zu reduzieren beziehungsweise im Idealfall zu vermeiden. Nicht zuletzt ist das Verhalten von Menschen ausschlaggebend, welche Auswirkungen eine Hitzewelle auf die menschliche Gesundheit hat. Leider sind nicht alle Menschen in der Lage, sich an Hitze anzupassen. Kleinkinder oder Menschen mit gesundheitlichen Belastungen oder eingeschränkter Mobilität (z. B. ältere Menschen in Seniorenresidenzen oder bettlägerige Patienten in Kliniken) haben nur wenige Möglichkeiten, ihre Hitze-Exposition zu reduzieren und sind häufig auch wesentlich hitzesensitiver als der Durchschnitt der Bevölkerung (z. B. durch gesundheitsbedingte Einschränkungen der Fähigkeit zur Thermoregulation). Daher sind für diese Bevölkerungsgruppen spezifische Maßnahmen erforderlich.

Klimatisierte Innenräume haben sich in Bezug auf Hitze als hochgradig wirksam erwiesen und werden daher in vielen Regionen der Erde weitverbreitet genutzt. Leider wird bis heute ein großer Teil der für die Raumklimatisierung erforderlichen Energie aus fossilen Energiequellen gewonnen, was mit Treibhausgasemissionen und zusätzlicher Wärmefreisetzung im Außenbereich einhergeht und in einem Teufelskreislauf das Problem des lokalen Stadtklimas wie auch des globalen Klimawandels verschärft.

Neben der auch aus anderen Gründen zwingend erforderlichen Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare

Energiequellen sind weitere Lösungsansätze wichtig. Passive Technologien und die verbesserte Nutzung klimaregulierender Ökosystemleistungen wie Schattenwurf von Stadtbäumen im Gebäudeumfeld bieten gut erprobte und kosteneffiziente Lösungen, die zukünftig verstärkt zum Einsatz kommen müssen. Bei hohen Lufttemperaturen und hoher Luftfeuchte führt aber in Städten der Tropen und Subtropen an Raumklimatisierung oft kaum ein Weg vorbei (sozusagen als *Ultima Ratio*), weshalb gerade dort ein baldiger Umstieg auf erneuerbare Energiequellen zwingend erforderlich ist.

Die Stadtklimaforschung wird ebenfalls weiterhin wichtige Beiträge zur Reduzierung der genannten Probleme leisten. Zunächst gilt es, die in diesem Beitrag angesprochenen offenen Forschungsfragen zu beantworten. Evidenzbasierte, gesicherte Erkenntnisse stellen die Grundlage für wissenschaftliche Lösungen dar. Darüber hinaus sind nachfolgend zwei Beispiele angeführt, die verdeutlichen, wie Stadtklimaforschung einen gesellschaftlichen Mehrwert erzeugt.

- 1.) Entwicklung und Planung von konkreten Lösungen erfordern wissenschaftliche Instrumente, um bereits vor einer Implementierung belastbare Aussagen zur Wirksamkeit zu treffen. Im Rahmen der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) von 2016 bis 2023 laufenden Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“ (*Urban Climate Under Change [UC]?*; SCHERER et al. 2019a) wurde das numerische, mikroskalige, turbulenzauflösende Atmosphärenmodell PALM zu einem für Stadtklimastudien optimierten Modellsystem namens PALM-4U weiterentwickelt (MARONGA et al. 2019). PALM-4U wurde mit Beobachtungsdaten und Windkanalexperimenten umfassend evaluiert (SCHERER et al. 2019b), für wissenschaftliche Untersuchungen eingesetzt (siehe Abb. 2-3) und mit zahlreichen Praxispartnern in Bezug auf seine Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit getestet (HALBIG et al. 2019). PALM-4U ist in der Lage, für unterschiedliche Wettersituationen und für alternative Varianten städtischer Strukturen (Gebäude, Quartiere, Stadtvegetation und Wasserflächen) die Auswirkungen projektierter Maßnahmen auf das Innen- und Außenraumklima zu berechnen und unterstützt somit unter anderem die Bestrebungen von Städten zur Verbesserung der Anpassung an die hitzebezogenen Auswirkungen des Klimawandels.
- 2.) Das zweite Beispiel ist das Stadtklima-Observatorium (*Urban Climate Observatory, UCO*) Berlin, das neben dem Stadtklima-Messnetz (*Urban Climate Observation Network, UCON*) mit den weltweit längsten stadtauflösenden Wetterzeitreihen zahlreiche Messinstrumente (40 m hoher Messmast mit Eddy-Kovarianz-Systemen in fünf unterschiedlichen Höhen (siehe Abb. 2-4), weitere Eddy-Kovarianz-Systeme, Ceilometer, Wind-LIDAR-Systeme, Temperatur und Feuchte-Profiler etc.) zur Erforschung der gesamten urbanen Grenzschicht und der darüber liegenden

freien Atmosphäre umfasst. Seit 2022 befindet sich auch ein X-Band Doppler-Wetter-RADAR mit dualer Polarisierung im Einsatz. Seit 2015 werden systematisch stündliche Daten von mittlerweile mehreren tausenden Bürgerwetterstationen gesammelt und qualitativ gesichert (MEIER et al. 2017).

Mit dynamischem Downscaling von ERA5-Reanalyse-daten werden für den Zeitraum ab 1980 und für die gesamte Region Berlin-Brandenburg einschließlich angrenzender Gebiete stündliche zwei- und dreidimensionale Gitterdaten mit 2 km Gitterauflösung berechnet und kontinuierlich aktualisiert. Aktuell sind die Daten von 1990 bis 2022 frei verfügbar (<https://www.tu.berlin/klima/forschung/regionalklimatologie/mitteleuropa/cer>) und werden im Sommer 2023 bis 1980 zurückreichen (CER v1, CER v2; JÄNICKE et al. 2017).

Das UCO Berlin dient auch dazu, die Wirksamkeit implementierter Maßnahmen evidenzbasiert ermitteln zu können. Mit Messungen zu CO₂-Flüssen an den Standorten Rothenburgstraße und Campus Charlottenburg der Technischen Universität Berlin des UCO Berlin konnte nachgewiesen werden, dass die pandemiebedingten Lockdown-Maßnahmen zu erheblichen Reduktionen von CO₂-Emissionen geführt haben (NICOLINI et al. 2022). Die Langzeitbeobachtungen des UCO Berlin ermöglichen somit, Wirkungen bereits erfolgter Maßnahmen nachzuweisen und im Falle nicht ausreichender Wirksamkeit die Notwendigkeit weiterer Eingriffe zu begründen. Dies gilt insbesondere auch für Maßnahmen zur Begrenzung des Temperaturanstiegs in Berlin.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass neben der Entwicklung und Implementierung wirksamer Maßnahmen zur Verminderung hitzebezogener Risiken weiterhin neue Erkenntnisse zu Temperatur und Hitze in Städten sowie Langzeitmessungen und -untersuchungen essenziell sind, um den wachsenden Herausforderungen der stadtspezifischen Folgen des Klimawandels adäquat begegnen zu können und somit auch einen Beitrag zu einer nachhaltigen Stadtentwicklung zu leisten.

Literatur

ALLEN, M.A., VOGGT, J.A., CHRISTEN, A., 2018. Time-continuous hemispherical urban surface temperatures. *Remote Sensing* **10**, 3.
 ARNFELD, A.J., 2003: Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchange of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* **23**, 1-26.
 BÖTTCHER, F., ZOSSEDER, K., 2022: Thermal influences on groundwater in urban environments – a multivariate statistical analysis of the subsurface heat island effect in Munich. *Science of the Total Environment* **810**, 152193.



Abbildung 2-4: 40 m hoher Messmast mit Eddy-Kovarianz-Systemen und Vierkomponenten-Strahlungsflussmessungen in fünf unterschiedlichen Höhen sowie weiteren Messinstrumenten am Standort Rothenburgstraße des UCO Berlin (Foto: Fred Meier).

CHRISTEN, A., VOGT, R., 2004: Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology* **24**, 1395-1421.
 EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G.A., SENIOR, C.A., STEVENS, B., STOUFFER, R.J., TAYLOR, K.E., 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* **9**, 1937-1958.
 FENNER, D., HOLTSMANN, A., KRUG, A., SCHERER, D., 2019a: 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**, 2422-2437.
 FENNER, D., HOLTSMANN, A., MEIER, F., LANGER, I., SCHERER, D., 2019b: Contrasting changes of urban heat island intensity during hot weather episodes. *Environmental Research Letters* **14**, 124013.
 FENNER, D., MEIER, F., BECHTEL, B., OTTO, M., SCHERER, D., 2017: Intra and inter ‘local climate zone’ variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift* **26**, 525-547.

- FENNER, D., MEIER, F., SCHERER, D., POLZE, A., 2014: Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001-2010. *Urban Climate* **10**, 308-331.
- FOKEN, T., PARLOW, E., GROSS, G., LEITL, B., 2023: Untersuchungsmethoden zum Stadtklima. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 97-114.
- HALBIG, G., STEURI, B., BÜTER, B., HEESE, I., SCHULTZE, J., STECKING, M., STRATBÜCKER, S., WILLEN, L., WINKLER, M., 2019: User requirements and case studies to evaluate the practicability and usability of the urban climate model PALM-4U. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 139-146.
- HOWARD, L., 1833: The Climate of London. Second edition, Vols. I-III. HARVEY and DARTON, ARCH, J. and A., LONGMAN and Co., HATCHHARD and Son, HIGHLEY, S., HUNTER, R., London.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PIRANI, A., CONNORS, S.L., PÉAN, C., BERGER, S., CAUD, N., CHEN, Y., GOLDFARB, L., GOMIS, M.I., HUANG, M., LEITZELL, K., LONNOY, E., MATTHEWS, J.B.R., MAYCOCK, T.K., WATERFIELD, T., YELEKÇI, O., YU, R., ZHOU, B. (Hrsg.)]. *Cambridge University Press*.
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B. et al., 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* **14**, 563-578.
- JÄNICKE, B., MEIER, F., FENNER, D., FEHRENBACH, U., HOLTSMANN, A., SCHERER, D., 2017: Urban-rural differences in near-surface air temperature as resolved by the Central Europe Refined analysis (CER): sensitivity to planetary boundary layer schemes and urban canopy models. *International Journal of Climatology* **37**, 2063-2079.
- JAUREGUI, E., GODINEZ, L., CRUZ, F., 1992: Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmospheric Environment* **26B**, 391-396.
- KIM, Y., BAIK, J., 2002: Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology* **41**, 651-659.
- KRUG, A., FENNER, D., MÜCKE, H.-G., SCHERER, D., 2020: The contribution of air temperature and ozone to mortality rates during hot weather episodes in eight German cities during the years 2000 and 2017. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **20**, 3083-3097.
- KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.
- MARONGA, B., GROSS, G., RAASCH, S., BANZHAF, S., FORKEL, R., HELDENS, W., KANANI-SÜHRING, F., MATZARAKIS, A., MAUDER, M., PAVLIK, D., PFAFFEROTT, J., SCHUBERT, S., SECKMEYER, G., SIEKER, H., TRUSILOVA, K., 2019: Development of a new urban climate model based on the model PALM – Project overview, planned work, and first achievements. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 105-119.
- MASSON, V., LEMONSU, A., HIDALGO, J., VOOGT, J., 2020: Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources* **45**, 411-444.
- MATZARAKIS, A., 2023: Hitze in Städten – Quantifizierung, Warnsysteme und Hitzeaktionspläne zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 61-70.
- MCCARTHY, M.P., BEST, M.J., BETTS, R.A., 2010: Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters* **37**, L09705.
- MEIER, F., FENNER, D., GRASSMANN, T., OTTO, M., SCHERER, D., 2017: Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Climate* **19**, 170-191.
- MULLER, C., CHAPMAN, L., GRIMMOND, C.S.B., YOUNG, D.T., CAI, X., 2013: Sensors and the City: a Review of Urban Meteorological Networks. *International Journal of Climatology* **33**, 1585-1600.
- NICOLINI, G., ANTONIELLA, G., CAROTENUTO, F. et al., 2022: Direct observations of CO2 emission reductions due to COVID-19 lockdown across European urban districts. *Science of the Total Environment* **830**, 154662.
- OKE, T.R., 1981: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology* **1**, 237-254.
- OKE, T.R., 1987: Boundary Layer Climates, 2nd edition. *Routledge*, London, 435 S.
- OKE, T.R., MILLS, G., CHRISTEN, A., VOOGT, J.A., 2017: Urban climates. *Cambridge University Press*, 546 S.
- PARLOW, E., 2003: The urban heat budget derived from satellite data. *Geographica Helvetica* **58**, 99-111.
- PARLOW, E., 2021, Regarding Some Pitfalls in Urban Heat Island Studies Using Remote Sensing Technology. *Remote Sensing* **13**, 3598.
- SCHERER, D., ANTRETTTER, F., BENDER, S., CORTEKAR, J., EMEIS, S., FEHRENBACH, U., GROSS, G., HALBIG, G., HASSE, J., MARONGA, B., RAASCH, S., SCHERBER, K., 2019a: Urban Climate Under Change [UC]2 – A National Research Programme for Developing a Building-Resolving Atmospheric Model for Entire City Regions. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 95-104.
- SCHERER, D., AMENT, F., EMEIS, S., FEHRENBACH, U., LEITL, B., SCHERBER, K., SCHNEIDER, C., VOGT, U., 2019b: Three-Dimensional Observation of Atmospheric Processes in Cities. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 121-138.
- SCHERER, D., FEHRENBACH, U., LAKES, T., LAUF, S., MEIER, F., SCHUSTER, C., 2013: Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. *DIE ERDE* **144**, 238-259.
- STEWART, I.D., 2019: Why should urban heat island researchers study history? *Urban Climate* **30**, 100484.
- STEWART, I.D., OKE, T.R., 2012: Local Climate Zones

- for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**, 1879-1900.
- VDI, 2015: VDI 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. *Beuth Verlag*, Berlin, 54 S.
- VOOGT, J., GRIMMOND, C.S.B., 2000: Modeling Surface Sensible Heat Flux Using Surface Radiative Temperatures in a Simple Urban Area. *Journal of Applied Meteorology* **39**, 1679-1699.
- VOOGT, J., OKE, T.R., 2003: Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of the Environment* **86**, 370-384.
- WICKI, A., PARLOW, E., 2017: Attribution of local climate zones using a multitemporal land use/land cover classification scheme. *Journal of Applied Remote Sensing* **11**, 026001.
- YIN, S., REN, C., ZHANG, X., HIDALGO, J., SCHOETTER, R., KWOK, Y.T., LAU, K.K., 2022: Potential of Synthetizing Climatopes and Local Climate Zones for Urban Climatic Planning Recommendations: A Case Study in Toulouse, France. *Cybergeo* **2022**, 1028.

Kontakt

PROF. DR. DIETER SCHERER
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie
Rothenburgstraße 12
12165 Berlin
dieter.scherer@tu-berlin.de

T. WINTERRATH, T. JUNGHÄNEL, K. LENGFELD, E. WALAWENDER, E. WEIGL

3 Starkregenereignisse im urbanen Raum – Monitoring auf Basis von Messstationen und Wetterradar

Heavy rainfall events in urban areas – monitoring on the basis
of measuring stations and weather radar

Zusammenfassung

Für die Planung, Bemessung und den Bau wasserwirtschaftlicher Anlagen im urbanen Raum bildet die stationsbasierte Starkregenstatistik KOSTRA-DWD bis heute die amtliche Grundlage. Darüber hinaus bieten seit gut zwei Jahrzehnten Wetterradardaten wichtige zusätzliche Informationen zur flächenhaften Niederschlagsverteilung. Der Ereigniskatalog CatRaRE listet – basierend auf der radarbasierten Niederschlagsklimatologie RADKLIM – alle Stark- und Dauerregenereignisse seit 2001 auf und bildet die Grundlage für räumliche statistische Analysen extremer Niederschlagsereignisse. Die Auswertung des Katalogs für den urbanen Raum zeigt eine hohe direkte Betroffenheit der Bevölkerung. Etwa drei Viertel aller Bundesbürgerinnen und -bürger waren in den Jahren 2001 bis 2021 von 5 bis 12 extremen Niederschlagsereignissen direkt betroffen; die Hälfte der Bevölkerung erlebte mindestens ein Ereignis mit einem flächengemittelten Starkregenindex von 5. In den betrachteten 21 Jahren war München unter den Großstädten mit mehr als 300.000 Einwohnerinnen und Einwohnern am stärksten von extremen Niederschlagsereignissen betroffen. Die flächenhafte Erfassung und Analyse von Starkniederschlägen bieten perspektivisch die Möglichkeit, klimatologische Effekte der Städte auf den Niederschlag zu untersuchen. Eine erste Fallstudie für die Stadt Bremen gibt einen Hinweis auf eine potenziell erhöhte Anzahl von Starkniederschlagsereignissen im Lee der Stadt.

Summary

For planning, design, and construction of hydraulic systems in urban areas the station-based heavy rain statistics KOSTRA-DWD represents the official basis. Furthermore, for more than two decades weather radar data provide important additional information on areal precipitation distribution. The event catalogue CatRaRE lists – based on the radar-based precipitation climatology RADKLIM – all short- and long-term precipitation events since 2001 and sets the basis for spatial statistical analyses of extreme precipitation events. Analysis of the catalogue for urban areas shows the German public being highly directly affected. Approximately three quarters of all German citizens were directly affected by 5 to 12 extreme precipitation events in the years 2001 to 2021; half of the population experienced at least one event with an area-averaged heavy precipitation index of 5. Over the considered 21 years, amongst all cities with more than 300,000 inhabitants Munich was affected the most by extreme precipitation events. Areal detection and analysis of heavy precipitation allows studies of climate effects of urban areas on precipitation. A first case study for the city of Bremen points to a potentially higher number of extreme precipitation events in the lee side of the city.

1 Einleitung

Niederschlag kann auf vielfältige Weise gemessen werden. Man unterscheidet zwischen direkten und indirekten Messmethoden. Unter letztere fallen unter anderem radar- und satellitenbasierte Messungen, die eine Ableitung des Niederschlags aus den Messgrößen der Instrumente ermögli-

chen. FISCHER und WINTERRATH (2021) geben einen umfangreichen Überblick über die verschiedenen Methoden zur Erfassung von Niederschlag. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) betreibt zur Messung des Niederschlags unter anderem ein Stations- sowie ein Radarnetzwerk. Die Vorteile der stationsbasierten Messungen liegen in der direkten quantitativen Messung des Niederschlags und in

der Verfügbarkeit langer Zeitreihen. Von Nachteil ist jedoch die Beschränkung auf einzelne Punkte im Messnetz. Insbesondere im Fall lokaler Starkregenereignisse kann dies zu einem Erfassungsproblem führen, wenn Ereignisse „durchs Netz fallen“. Wetterradare ermöglichen im Gegensatz dazu eine flächendeckende Erfassung des Niederschlags. Aufgrund der indirekten Messmethodik ist jedoch eine Umrechnung der gemessenen Radarreflektivitäten in Niederschlagsmengen notwendig. Der DWD kombiniert die flächenhaften Radarmessungen mit den quantitativen Punktmessungen der Stationen, um die Vorteile aus beiden Verfahren zu ziehen. Systematische, flächendeckende Radarmessungen liegen in Deutschland seit dem Sommer 2000 vor. Während die stationsbasierten Niederschlagsmessreihen eine robuste Datengrundlage für die (extremwert-)statistische Auswertung darstellen, bieten die radarbasierten Niederschlagsfelder die Möglichkeit, (extreme) Niederschlagsereignisse in ihrer flächenhaften Charakteristik und zeitlichen Entwicklung zu überwachen. Beide Datensätze sind von großer Wichtigkeit für die Analyse von Starkregenereignissen. Unstrittig ist bereits jetzt, dass Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung notwendig sind, um die Bevölkerung vor den Gefahren durch Starkregenereignisse zu schützen. Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung der erwarteten Zunahme von Starkregen im Kontext des Klimawandels. Informationen und Handlungsempfehlungen zum Thema Bevölkerungsschutz gegenüber Starkregen wurden jüngst in einer Publikation des Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK 2022) zusammengefasst. Nachhaltige Anpassungsmaßnahmen umfassen beispielsweise die Erhöhung der Kapazitäten einer lokalen Wasserspeicherung – Stichwort „Schwammstadt“ – durch Dachbegrünungen (PAULEIT et al. 2023) oder dezentrale Retentionsinfrastrukturen. Die Leitlinie (WMO 2019) zeigt schließlich die Notwendigkeit der Entwicklung ganzheitlicher Dienste auf dem Weg zur resilienten Stadt auf.

2 Datensätze

2.1 Stationsbasierte Datensätze

Um langjährige Analysen zum Niederschlagsverhalten durchführen zu können, bleibt bis heute nur der Rückgriff auf Zeitreihen bodengebundener Messstationen. Das Messprinzip hat sich dabei über die letzten 150 Jahre kaum verändert. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wurden in Mitteleuropa und dem damaligen deutschen Staatsgebiet einheitliche Richtlinien zur Messung von Niederschlag geschaffen. Bis heute sind Regenschreiber und Regenschreiber, zum Beispiel nach Hellmann, bekannte Messgeräte. Zeitlich hochaufgelöste Daten liegen aber erst seit 1951 in relevanter Menge und erst ab Mitte der 2000er Jahre in größerer Zahl vor (Abb. 3-1). Stationsdaten bieten den Vorteil einer direkten und quantitativen Messung. Allerdings handelt es sich dabei immer um punktuelle Messungen, die nur eine gewisse räumliche Repräsentanz besitzen. Zudem sind Stationen räumlich unregelmäßig in Messnetzen organisiert. In

Deutschland sind heute mittlere Abstände zwischen den Stationen von ca. 20 km im flachen Norddeutschland sowie ca. 10 km im Mittelgebirgsraum und Süddeutschland anzusetzen. Das Niederschlagshauptmessnetz wird vor allem vom Deutschen Wetterdienstes und der Bundeswehr betrieben und zusätzlich beispielsweise von Landesbehörden, Wasserverbänden oder kommunalen Wasserbetrieben verdichtet. Insbesondere letztere messen Niederschlag proaktiv und aus eigenem Interesse. Einige größere Städte (z. B. Berlin, Hamburg, München oder Frankfurt am Main) betreiben schon seit einigen Jahrzehnten eigene Niederschlagsmessnetze mit zeitlich hochaufgelöster Messung. Aber auch kleinere Kommunen setzen in Folge von Starkniederschlag und Sturzfluten mehr und mehr auf eigene Messungen. In den letzten Jahren wurden diese Daten zunehmend zugänglich gemacht und sind auch in die aktuellen Starkregenstatistiken eingeflossen (z. B. KOSTRA-DWD-2020; JUNGHÄNEL et al. 2022). Vor allem bei der Niederschlagsmessung im urbanen Raum mittels klassischer Geräte ist man mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert (OKE 2006). Optimale Messstellen sind rar, und oft schirmen Gebäude oder Vegetation teilweise die Messung ab beziehungsweise variieren diese durch das geänderte Strömungsfeld. Dennoch liefern gerade langjährige Messreihen einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der örtlichen Gegebenheiten.

Um an jedem Ort in Deutschland klimatologische Werte bereitstellen zu können, werden die Stationsdaten mittels geostatistischer Methoden regionalisiert. Mit dem HYRAS-Datensatz (Hydrometeorologische Rasterdaten; RAUTHE et al. 2013) werden unter anderem tägliche Niederschlagssummen ab 1931 für Deutschland bereitgestellt. Das Verfahren arbeitet dabei in zwei Stufen: Zunächst werden für alle 12 Monate 30-jährige Mittel der Niederschlagssummen (1971–2000) erzeugt. Die Regionalisierung der Mittelwerte erfolgt dann mittels multipler linearer Regression (geografische Länge und Breite, Höhe, Expositionsrichtung und -betrag) und Inverse-Distanz-Wichtung (IDW). In einem zweiten Schritt werden die Tageswerte an den Stationen mit den monatlichen Hintergrundfeldern normiert und räumlich mittels IDW interpoliert. Anschließend wird das gesuchte Tagesrasterfeld durch Multiplikation der Anomalien mit dem Hintergrundfeld berechnet. Anzumerken ist, dass die Zahl der eingehenden Tageswertstationen über die Zeit schwankt. So stehen in den 1930er Jahren deutlich weniger Stationen als heute zur Verfügung. Die größte Zahl der Tageswertstationen wird in den 1990er Jahren erreicht. Der HYRAS-Datensatz gilt heute in vielerlei Hinsicht als Referenz, zum Beispiel bei der Evaluierung historischer Zeitabschnitte von Klimamodellen. Er löste im Jahr 2022 den REGNIE-Datensatz (Regionalisierte Niederschläge) ab.

Der Datensatz KOSTRA-DWD (Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung) bietet hingegen Informationen zu statistischen Starkniederschlagshöhen in Deutschland. KOSTRA-DWD wird bereits seit mehr als 30 Jahren vom DWD, gemeinsam mit Vertreterinnen und Vertretern der Bundesländer sowie aus Wissenschaft und Praxis, regelmäßig erarbeitet. Die letzte Fortschreibung der

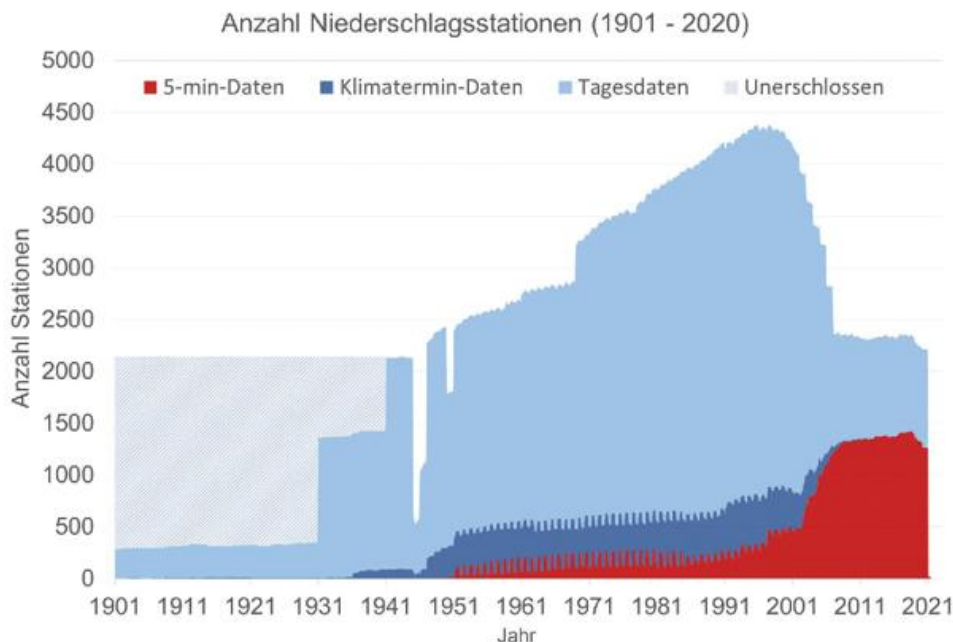


Abbildung 3-1: Anzahl der Niederschlagsstationen pro Monat, für die dem DWD derzeit Daten vorliegen. Rot: Stationen mit zeitlich hochaufgelöster Messung. Dunkelblau: Stationen mit drei Messterminen am Tag (vgl. Mannheimer Stunden). Hellblau: Stationen mit einem Messtermin morgens am Tag.

Starkniederschlagsauswertung wurde Ende 2022 als KOSTRA-DWD-2020 veröffentlicht. Sie beruht vor allem auf den Daten der Jahre 1951–2020. Im Rahmen der Starkniederschlagsauswertung werden Niederschlagshöhen (in mm) und Niederschlagsspenden (in l/(s ha)) berechnet. Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit von verschiedenen Dauerstufen (5 Minuten bis 7 Tage) beziehungsweise Jährlichkeiten (1 Jahr bis 100 Jahre). Die Ergebnisse werden anschließend auf ein deutschlandweites 5 km × 5 km-Rasternetz übertragen.

Ein wesentlicher Anwendungsbereich für die rasterbasierten Starkniederschlagsauswertungen ist die Dimensionierung wasserwirtschaftlicher Bauwerke. Dazu gehören zum Beispiel Kanalnetze, Kläranlagen, Pumpwerke und Rückhaltebecken. Auch für die Dimensionierung von Entwässerungssystemen von Dächern und Grundstücken sowie von Versickerungsanlagen werden sie herangezogen. Mithilfe von KOSTRA-DWD ist es jedoch auch möglich, die Niederschlagshöhe starker Regenereignisse bezüglich ihrer Wiederkehrzeit einzuschätzen. Dieses Vorgehen dient häufig der Bewertung von Schadensereignissen.

Zur Vorbereitung der aktuell vorliegenden Fortschreibung wurde im Forschungsprojekt MUNSTAR (Methodische Untersuchungen zur Novellierung der Starkregenstatistik für Deutschland) das Vorgehen grundlegend überarbeitet (JUNGHÄNEL et al. 2022): In einem ersten Schritt wurde die Datenbasis erneut deutlich erweitert; dazu gehörte einerseits die Aufarbeitung historischer Daten. Hierbei lag der Fokus auf der Digitalisierung von Registrierstreifen mechanischer Regenschreiber. Innerhalb des Projektes wurden insgesamt rund 191.000 Beobachtungstage digitalisiert. Die Arbeiten werden beim DWD über das Projekt hinaus fortgesetzt. Andererseits flossen auch Datenreihen

anderer Betreiber (z. B. Landesämter, Wasserverbände oder kommunale Wasserbetriebe) in die Auswertung ein. Hier konnten deutschlandweit über 1.400 Stationsreihen, davon mindestens 270 mit Zeitreihen länger als 30 Jahre, identifiziert werden, die bei vorangegangenen Fortschreibungen keine oder nur eine untergeordnete Rolle gespielt hatten. Alle Daten wurden umfassend qualitätskontrolliert und auf Stationarität sowie Homogenität geprüft. Die Plausibilität der zeitlich hochaufgelösten Niederschlagsreihen wurde, je nach Verfügbarkeit, anhand von Tages- bzw. Klimaterminwerten, täglichen Rasterdaten (HYRAS), sowie Daten aus der Radarklimatologie (RADKLIM; YW- und RY-Produkt, siehe Abschnitt 2.2) geprüft. Zudem sollte die Tagessumme der zeitlich hochaufgelösten Reihen (Regenschreiber) den Tageswert der konventionellen Messung (Hellmann) ergeben (interne Konsistenz). Dazu wurden die zeitlich hochaufgelösten Reihen mit den konventionell gemessenen Tageswerten skaliert.

In einem zweiten Schritt wurde die zugrundeliegende extremwertstatistische Methodik dem aktuellen Stand der Wissenschaft angepasst. Hierbei ist vor allem die Würdigung des sogenannten *Heavy-Tail*-Verhaltens der Extremwerte durch Schätzung mit nunmehr drei statt nur zwei Parametern der Generalisierten Extremwert-Verteilung (GEV) zu nennen (KOUTSOYIANNIS et al. 1998). Außerdem wird nun auch eine Schätzung über alle Dauerstufen (5 Minuten bis 7 Tage) hinweg durchgeführt (früher Ausgleich über drei Dauerstufenbereiche), wobei Reihen jährlicher Maxima (Block-Maximum-Methode) und ein Ansatz nach KOUTSOYIANNIS et al. (1998) zugrunde liegen. Im Gegensatz zum alten Datensatz KOSTRA-DWD-2010R (JUNGHÄNEL et al. 2017) wird eine 5-parametrische Verteilungsfunktion verwendet, wobei der Form- bzw. *Shape*-Parameter konstant mit 0,1 angenommen wird.

Um auch Werte für Orte, für die keine Messungen existieren, zur Verfügung zu stellen, wurde die Methode der Regionalisierung von Starkniederschlägen ebenfalls angepasst. Hier war ein Umdenken notwendig, da zum Beispiel Untersuchungen von Radardaten ergaben, dass der Einfluss der Orografie mit sinkender Dauerstufe ebenfalls abnimmt (WINTERRATH et al. 2017). Im Projekt MUNSTAR wurden verschiedene Verfahren geprüft, verglichen und eine beste Methode mittels Validierung ermittelt. Die Wahl fiel auf ein geostatistisches *Kriging*-Verfahren mit externer *Drift* (WACKERNAGEL 2003). Den Ausgangspunkt bilden über 130 lange Stationsreihen mit zeitlich hochaufgelöster Messung. Das Hintergrundfeld für die externe *Drift* wird aus kürzeren Stationsreihen (mindestens zehn volle Beobachtungsjahre) gebildet. An jeder Station wird eine extremwertstatistische Schätzung durchgeführt. Dann wird jeder Parameter einzeln regionalisiert, womit schließlich für jeden Rasterpunkt die Starkniederschlagshöhen in Abhängigkeit von Dauerstufe und Wiederkehrzeit bestimmt werden können (SHEHU et al. 2022).

Nachdem das Projekt MUNSTAR im Jahr 2021 erfolgreich abgeschlossen wurde, implementierte der DWD die Methoden und überführte diese in den operationellen Betrieb. Nach weiteren Untersuchungen und Abstimmungen mit den Bundesländern wurde die neue Version von KOSTRA-DWD Ende 2022 veröffentlicht. Nach einer kurzen Übergangszeit löste der neue Datensatz KOSTRA-DWD-2020 den bisherigen Datensatz KOSTRA-DWD-2010R zum 01.01.2023 offiziell ab.

Ein direkter Vergleich von altem und neuem Datensatz gestaltet sich natürlich schwierig, da sich diese in der Methodik, Datengrundlage und im Bezugszeitraum stark unterscheiden. Differenzen zwischen beiden Datensätzen können sich also aus verschiedenen Gründen ergeben. Die Ergebnisse lassen aber im Mittel über Deutschland eher eine Anhebung der Bemessungsniederschläge erwarten. Nur bei Dauerstufen um $D = 60$ min werden die Bemessungsniederschläge im Mittel nach unten korrigiert. Hier ist die Ursache vor allem bei methodischen Unterschieden zu suchen. Sehr große Änderungen sind zudem im Bereich der sehr kurzen Dauerstufen ($D = 5$ min) zu erwarten, der besonders bei der Bemessung zur Dach- und Grundstücksentwässerung im urbanen Raum eine wesentliche Rolle spielt. Untersuchungen im Projekt MUNSTAR zeigten, dass es hier in der Vergangenheit zu einer Unterschätzung der Starkniederschlagshöhen in den älteren Teilen der Zeitreihen kam, bei denen ein mechanischer Regenschreiber verwendet wurde. Mit diesen Geräten konnten nach heutigem Wissensstand große Niederschlagsmengen in sehr kurzer Zeit nur unzureichend erfasst werden.

Das Monitoring von Starkniederschlägen wird heute vor allem mittels Niederschlagsmessstationen oder anhand von Radardaten durchgeführt. Oft wird auch eine Kombination aus beiden Messsystemen genutzt, da im urbanen Raum besonders die flächenhafte Niederschlagsverteilung von Interesse ist.

2.2 Die radarbasierte Niederschlagsklimatologie RADKLIM

Der DWD betreibt ein Netzwerk aus 17 C-Band-Radaren. Der im Jahr 2000 mit der Errichtung des Dresdner Radars komplettierte Verbund deckt mit dem bodennahen Niederschlagsscans mit einer Reichweite von aktuell 150 km nahezu das gesamte Gebiet Deutschlands ab. Wetterradare senden elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich (Signalfrequenz etwa 5,6 GHz) aus und detektieren die an Hydrometeoren zurückgestreute Strahlung. Die Messungen erlauben somit Rückschlüsse auf den fallenden Niederschlag. Da es sich bei der Radarmessung um eine indirekte Messung des Niederschlags handelt, kombiniert der DWD die radarbasierten Niederschlagsschätzungen mit direkten, quantitativen Messungen der Pluviometer am Boden. Dieses als „Aneichung“ bezeichnete Verfahren wurde im Rahmen von RADOLAN (RADarOnLineAneichung) entwickelt und seitdem im Rahmen der operationellen Niederschlagsbestimmung angewendet. Mit dem Projekt „Radar-klimatologie“ der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ in den Jahren 2014 bis 2017 hat der DWD begonnen, die radarbasierte Niederschlagsbestimmung beginnend mit dem 01.01.2001 zu reprozessieren. Das Ergebnis ist der RADKLIM-Datensatz, der im Folgenden kurz skizziert wird:

- Verwendung der lokalen Radarreflektivität (DX-Produkt) mit einer Reichweite von 128 km über den Gesamtzeitraum
- Anwendung einer einheitlichen RADOLAN-Software
- Zusätzliche Korrekturverfahren, zum Teil unter Verwendung längerer Akkumulationen
- Zusätzliche Verwendung disaggregierter Tagesstationsdaten zur Aneichung

Die Korrekturverfahren zielen insbesondere auf die Eliminierung von blockierten Sektoren (Speichen) sowie die Korrektur der Signalabschwächung mit zunehmender Messhöhe des Radarstrahls ab. Detaillierte Informationen zum RADKLIM-Datensatz sind WINTERRATH et al. (2017) zu entnehmen. Die aktuelle RADKLIM-Version 2017.002 (WINTERRATH et al. 2018) wird jährlich, ergänzt um das vorangegangene Jahr, fortgeschrieben. Die Daten sind auf dem Open-Data-Server des DWD abzurufen. Alle Links finden sich auf www.dwd.de/radklim.

Der RADKLIM-Datensatz stellt einen hochwertigen Niederschlagsdatensatz dar, der nahezu alle Niederschlagsereignisse – auch lokale, kleinräumige Starkregen – umfasst. Er stellt somit eine wichtige Datengrundlage für statistische Analysen extremer Niederschlagsereignisse dar, sowohl im ländlichen als auch im urbanen Raum.

2.3 Der RADKLIM-basierte Ereigniskatalog CatRaRE

Der RADKLIM-Datensatz ermöglicht die Charakterisierung einzelner Niederschlagsereignisse in ihrer räumlichen Ausprägung sowie zeitlichen Entwicklung. Im Rahmen des

vom Gesamtverband der Versicherer (GDV) finanzierten Projekts „Ableitung deutschlandweiter Zusammenhänge von versicherten Schäden zu kleinräumigen Starkregenereignissen basierend auf hochauflösenden radar-gestützten Niederschlagsmessungen des DWD seit Januar 2001 (Starkregenprojekt)“ sowie des Projekts „Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikoversorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung (KlamEx)“ der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ entwickelte der DWD auf Basis der RADKLIM-Daten Kataloge extremer Niederschlagsereignisse als Grundlage für die Analyse des Starkregengeschehens und seines Schadenpotenzials in Deutschland seit 2001.

Datenbasis für die Bestimmung der Starkregenereignisse ist die angeeichte Stundensumme (RW-Produkt) aus RADKLIM. Die Ereignisse werden auf der Basis elf vordefinierter Dauerstufen zwischen einer und 72 Stunden bestimmt. Für jede Stunde der gesamten Zeitreihe werden räumlich zusammenhängende Niederschlagsgebiete identifiziert und als sogenannte Niederschlagsobjekte abgelegt. Dabei gehen alle Gitterzellen ein, deren Niederschlagsmenge einen gewählten Schwellenwert (DWD-Warnstufe 3 für Unwetter (W3) oder Jährlichkeit von 5 Jahren berechnet aus den RADKLIM-RW-Daten (T5)) überschritten haben. Die Bestimmung der Niederschlagsobjekte erfolgt dabei unabhängig für alle Dauerstufen. Aus allen abhängigen Objekten eines Niederschlagsereignisses (es kann beispielsweise für ein Ereignis der gewählte Schwellenwert für mehrere Dauerstufen oder aufeinanderfolgende Stunden überschritten werden), wird dasjenige mit der größten Extremität (E_{ts}) als repräsentativ ausgewählt und in den Katalog aufgenommen. Die Extremität ist dabei definiert über das Produkt aus der mittleren logarithmierten Wiederkehrzeit über die Objektfläche multipliziert mit dem effektiven Radius des Objekts und leitet sich aus dem *Weather Extremity Index* (WEI) nach MÜLLER und KASPAR (2014) ab.

Die Kataloge (LENGFELD et al. 2021) enthalten alle in Deutschland seit 2001 aufgetretenen Stark- und Dauerregenereignisse. Jedes Ereignis ist im Katalog räumlich über den Ort des maximalen Niederschlags sowie ein Polygon der repräsentativen räumlichen Ausdehnung definiert und mit diversen Attributen charakterisiert. Diese sind zum einen ereignisspezifische Attribute wie die Flächenausdehnung und die Niederschlagsintensität. Darüber hinaus enthält der Katalog Daten der Umgebung, zum Beispiel geografische und demografische Daten des Ereignisortes, wie den vorherrschenden Versiegelungsgrad und die Bevölkerungsdichte.

Die Ereigniskataloge (LENGFELD et al. 2022a, 2022b) stehen sowohl in Tabellenform als auch als GIS-lesbare Dateien zur Verfügung. Typische Anwendungen umfassen die räumliche Selektion und ein Ranking der Ereignisse nach definierten Kriterien – beispielsweise der Extremität – sowie die statistische Analyse des Auftretens extre-

men Niederschlags bestimmter Charakteristiken. Darüber hinaus stellen die Kataloge ein geeignetes Werkzeug für die Nachbetrachtung extremer Niederschlagsereignisse, insbesondere in Kombination mit den Niederschlagsdaten aus RADKLIM, dar.

Detaillierte Informationen finden sich auf der Webseite www.dwd.de/catrare (CatRaRE = *Catalogue of Radar-based heavy Rainfall Events*). Hier findet sich ebenso der Link zum Dashboard, einer interaktiven, webbasierten Darstellung der Kataloge. Im Folgenden beziehen sich alle Auswertungen auf den Katalog nach Schwellenwert W3.

3 Radarbasiertes Monitoring extremer Niederschlagsereignisse in Deutschland

3.1 Extreme Niederschlagsereignisse im urbanen Raum

Um die Betroffenheit des urbanen Raums durch extreme Niederschlagsereignisse zu bestimmen, bieten die radarbasierten Niederschlagsdaten den Vorteil einer räumlichen Darstellung der Ereignisse. Der Katalog CatRaRE ermöglicht die Selektion und statistische Auswertung aller Stark- und Dauerregenereignisse für definierte Regionen in Deutschland, im Folgenden den urbanen Raum. Abschnitt 3.1.1 zeigt Ergebnisse einer Ereignisstatistik für die 22 bevölkerungsreichsten deutschen Großstädte. Abschnitt 3.1.2 präsentiert deutschlandweite Ereignisstatistiken der Betroffenheit des urbanen Raums und der Bevölkerung.

3.1.1 Ereignisstatistiken zu deutschen Großstädten

Für diese Analyse wurden die charakteristischen Flächen aller detektierten Ereignisse mit den Flächen der bevölkerungsreichsten deutschen Großstädte mit einer Einwohnerzahl > 300.000 verschnitten und somit die Betroffenheit der Städte zwischen 2001 und 2021 ermittelt.

Um eine Vergleichbarkeit unabhängig von der absoluten Flächenausdehnung der Großstädte zu erreichen, wurde für jedes Ereignis zusätzlich der prozentuale Anteil der betroffenen an der gesamten Stadtfläche ermittelt und für alle Ereignisse über die zugrundeliegenden 21 Jahre aufsummiert. Aufgrund dieser additiven Betrachtung können Werte > 100% auftreten, wobei hier keine Aussage über die real betroffenen Flächenanteile einer Stadt getroffen werden kann.

In Tabelle 3-1 ist das Ranking entsprechend der relativen Flächenbetroffenheit sowie weiterer Parameter für die ausgewählten deutschen Großstädte dargestellt. Die stärkste Betroffenheit zeigt München – sowohl mit 2070% in relativen Zahlen als auch mit 7347 km² akkumulierter Ereignisfläche (in polarstereographischer RADOLAN-Projektion; die reale Flächengröße kann leicht abweichen) in absoluten Zahlen. Auf Platz 2 findet sich Wuppertal aufgrund der hohen Betroffenheit auf relativ kleiner Stadtfläche, wäh-

Tabelle 3-1: Betroffenheit der 22 bevölkerungsreichsten Großstädte Deutschlands durch extreme Niederschlagsereignisse in den Jahren 2001 bis 2021. Die betroffene Fläche wurde durch Verschnittung der Ereigniszonen mit den die Stadtfläche beschreibenden Polygonen ermittelt. Die Reihenfolge entspricht dem Ranking nach relativer betroffener Stadtfläche (Datenbasis: CatRaRE v. 2022.01 W3_Eta, © GeoBasis-DE / BKG 2020).

Stadt (>300 000 Einwohner)	Niederschlagsereignisse 2001 - 2021 (CatRaRE W3Eta, D: 1 bis 72 Stunden)													
	Einwohnerzahl (31.12.2020)		Stadtfläche (RADKLIM Pixel)		Ereignisse, die die Stadt betrafen		Betroffene Fläche (RADKLIM Pixel)		Betroffene Fläche (Stadtanteil, %)		Ereignismaxima innerhalb der Stadt		Ereignisdauer (Stundenstunde)	
	Zahl	Rang	Zahl	Rang	Zahl	Rang	Zahl	Rang	Zahl	Rang	Zahl	Rang	Zahl	Rang
München	1488202	3	355,0	5	125	1	7346,8	1	2069,7	1	43	2	1359	1
Wuppertal	355004	17	184,4	19	55	10	2064,8	10	1119,7	2	9	19	1002	2
Leipzig	597493	8	326,9	8	66	4	3611,7	4	1104,8	3	28	4	574	7
Karlsruhe	308436	22	196,2	18	46	16	2118,3	9	1079,8	4	16	12	395	16
Bonn	330579	19	156,1	22	37	19	1555,2	15	996,1	5	12	17	372	17
Dresden	556227	12	360,0	4	58	8	3510,1	5	975,1	6	25	5	628	6
Stuttgart	630305	6	237,4	14	62	6	2199,1	8	926,4	7	18	9	492	9
Mannheim	309721	21	162,5	20	47	14	1443,1	16	888,2	8	14	14	420	14
Essen	582415	10	229,9	15	59	7	1811,5	13	788,0	9	21	7	629	5
Nürnberg	515543	14	210,3	17	49	13	1645,9	14	782,6	10	13	16	450	12
Bochum	364454	16	158,1	21	39	18	1220,6	20	771,9	11	5	21	448	13
Bielefeld,	333509	18	281,1	10	46	15	2049,4	11	729,1	12	14	15	485	10
Berlin	3664088	1	961,4	1	97	2	6626,8	2	689,3	13	53	1	708	4
Münster	316403	20	329,4	7	50	12	2207,9	7	670,3	14	18	10	398	15
Dortmund	587696	9	305,2	9	53	11	1992,3	12	652,9	15	16	13	571	8
Köln	1083498	4	447,0	3	62	5	2724,9	6	609,6	16	21	8	473	11
Hamburg (ohne Inseln)	1852478	2	784,7	2	85	3	4410,8	3	562,1	17	39	3	868	3
Düsseldorf	620523	7	238,1	13	31	20	1271,5	18	534,0	18	8	20	368	18
Duisburg	495885	15	254,6	12	30	21	1261,8	19	495,6	19	10	18	297	20
Frankfurt am Main	764104	5	275,6	11	55	9	1273,1	17	461,9	20	23	6	283	21
Hannover	534049	13	220,7	16	20	22	953,2	22	432,0	21	5	22	239	22
Bremen (ohne Hafen)	566573	11	340,8	6	42	17	1211,1	21	355,4	22	17	11	366	19

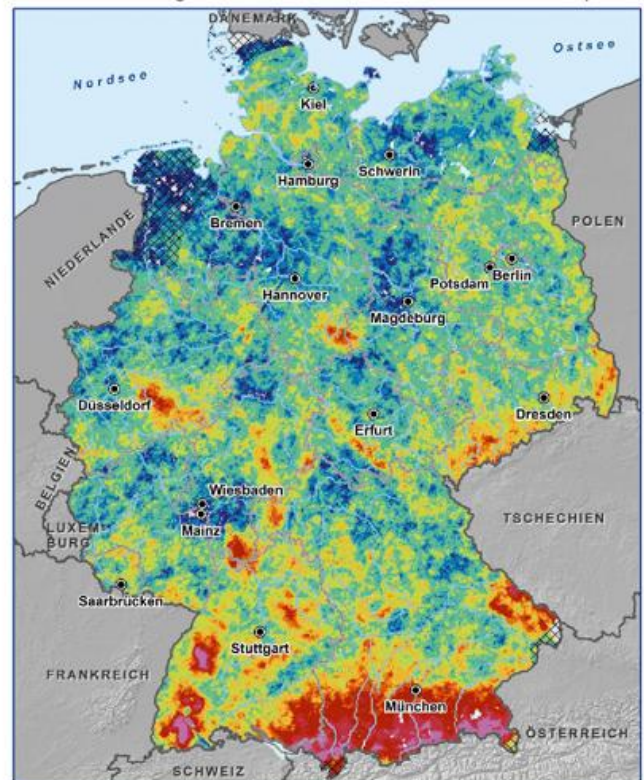
rend Berlin mit einer großen akkumulierten Ereignisfläche aufgrund der großen Stadtfläche bezüglich der relativen Betroffenheit nur auf Platz 13 landet. Das Schlusslicht bildet die Stadt Bremen (ohne Hafen).

Darüber hinaus enthält Tabelle 3-1 die Anzahl der Ereignismaxima innerhalb der Stadtfläche, die Anzahl der Ereignispolygone, die die Stadtfläche schneiden, sowie die Gesamtdauer der Ereignisse innerhalb der Städte.

3.1.2 Statistiken zu Extremereignissen im urbanen Raum

Abbildung 3-2 zeigt die deutschlandweite Verteilung der Ereignisanzahlen pro Raster zwischen 2001 und 2021. Die Verteilung spiegelt größtenteils die Topografie Deutschlands wider. Extremereignisse sind jedoch insgesamt in den letzten 21 Jahren in allen Regionen Deutschlands aufgetreten. Um die Betroffenheit der Bevölkerung sowie der urbanen Regionen Deutschlands näher zu analysieren, wurden die Ereignisanzahlen pro Rasterfläche mit den entsprechenden geografischen und demografischen Daten kombiniert. Dabei zeigt sich, dass ungefähr drei Viertel der deutschen Bevölkerung 5 bis 12 Ereignissen in 21 Jahren direkt ausgesetzt waren (Abb. 3-3). Analysiert man die Betroffenheit separat für jedes Kalenderjahr, so ergibt sich, dass im Jahr 2002 ungefähr die Hälfte der deutschen Bevölkerung von mindestens einem extremen Niederschlagsereignis getroffen wurde (Abb. 3-4). In 6 der 21 betrachteten Jahre waren mehr als 35 Millionen Bundesbürgerinnen und -bürger direkt beeinflusst, der Großteil allerdings nur einem Ereignis pro Jahr ausgesetzt. Die maximale Betroffenheit in einem Jahr liegt bei 9 Ereignissen. Auch das Jahr 2021 zeigt eine große Beeinflussung durch Extremereignisse. Dabei sei darauf hingewiesen, dass hier ausschließlich die direkte

Ereignisanzahl 2001-2021 (1-72 h, pro RADKLIM Pixel)
 (CatRaRE W3 E_{TA} v2022_01, auf Basis der stündlichen Niederschlagszeitreihen der RADKLIM-Version 2017.002)



Geodaten: © GeoBasis-DE / BKG 2020 (Stand: 01.01.2020), Klimadaten und Darstellung: © DWD 2022

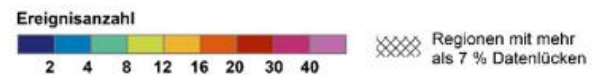


Abbildung 3-2: Anzahl extremer Niederschlagsereignisse aller betrachteten Dauerstufen pro RADKLIM-Pixel für die Jahre 2001 bis 2021. Die schraffierten Flächen markieren Regionen, in denen der zugrundeliegende RADKLIM-Datensatz viele Fehlwerte aufweist (Datenbasis: CatRaRE_W3_Eta_v2022.01).

Betroffene Bevölkerungsanzahl pro Ereignisanzahl in 2001 - 2021

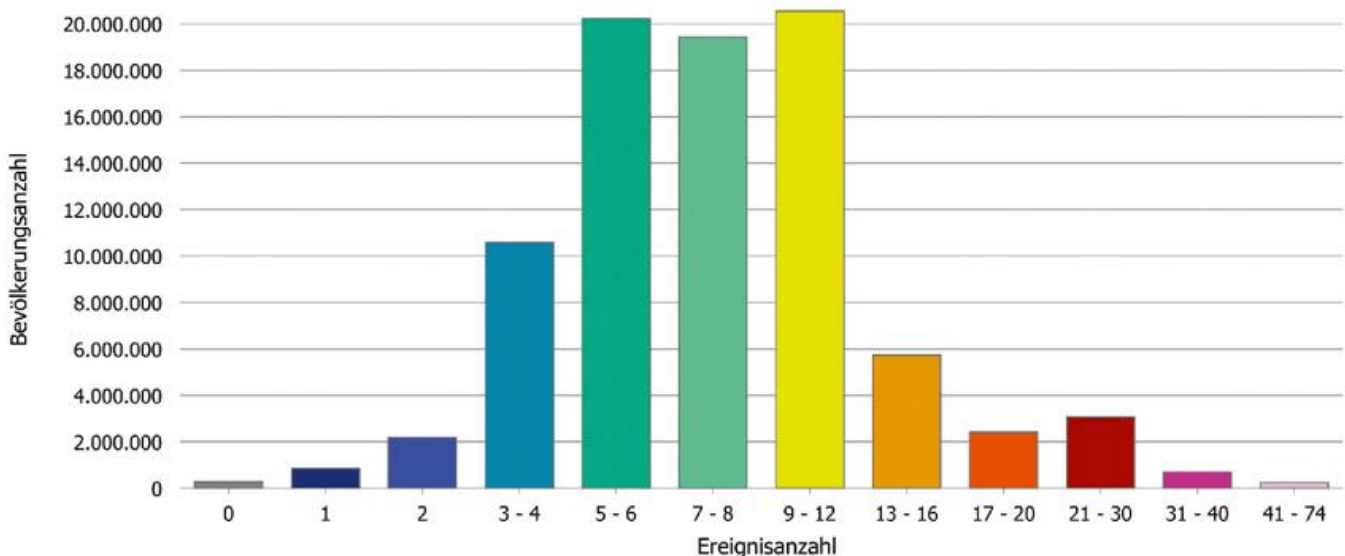


Abbildung 3-3: Bevölkerungsanzahl pro Ereignisanzahlklasse. Bei der Herleitung wurden alle Daten verwendet, die weniger als 10 % Fehlwerte im zugrundeliegenden RADKLIM-Datensatz vorweisen (Datenbasis: CatRaRE_W3_Eta_v2022.01; Zensus2011 (1-km-Raster), © Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2015).

Jährliche Bevölkerungsanzahl, die direkt von einem oder mehreren Ereignissen betroffen war

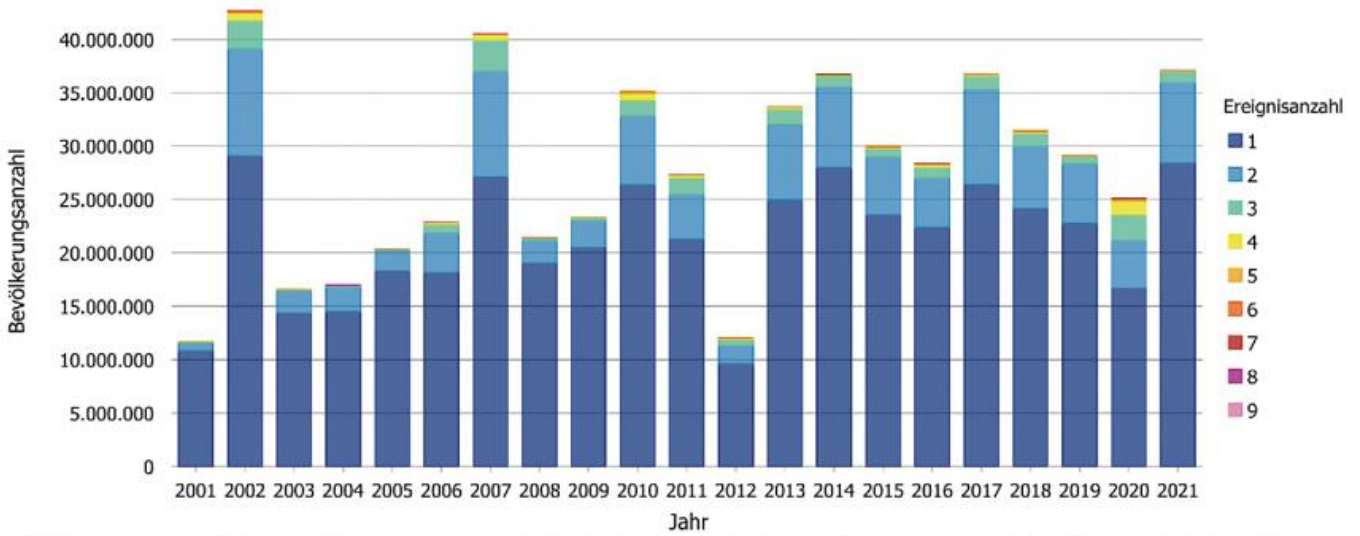


Abbildung 3-4: Anzahl der Bevölkerung pro Kalenderjahr, die direkt von mindestens einem extremen Niederschlagsereignis betroffen war. Die Farbwerte stellen die Ereignisanzahl dar. Teile der Bevölkerung waren maximal von 9 Ereignissen in einem Jahr betroffen (Datenbasis: CatRaRE_W3_Eta_v2022.01; Zensus 2011 (1-km-Raster), © Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2015).

meteorologische Betroffenheit am Ort des Niederschlags analysiert wird; eine Betroffenheit durch nachfolgende Hochwasser wie im Juli 2021 an der Ahr kann allein auf Basis des Niederschlagskatalogs nicht bestimmt werden.

Bezieht man zusätzlich zur Ereignisanzahl den Starkregenindex (SRI) nach SCHMITT et al. (2018) – eine Maßzahl zur Klassifikation der Niederschlagsintensität auf Basis der statistischen Häufigkeit – in die Analyse ein, so zeigt sich, dass ungefähr die Hälfte der Bevölkerung Deutschlands innerhalb des Zeitraums von 2001 bis 2021 mindestens ein Ereignis mit einem mittleren SRI (SRImean) von 5 direkt erlebt hat (Abb. 3-5). Knapp die Hälfte der Bevölkerung

erlebte mindestens ein Ereignis, das mindestens als außergewöhnlicher Starkregen klassifiziert wurde. SRImean berechnet sich dabei als Mittelwert über die charakteristische Ereignisfläche und kann lokal innerhalb des Ereignisses auch höher ausfallen. Er liegt damit in der Regel deutlich niedriger als der Maximalwert eines Ereignisses.

Abbildung 3-6 zeigt die von extremen Niederschlagsereignissen beeinflussten Flächen, aufgeteilt nach den CORINE-Bodenbedeckungsklassen. Die Ereignisanzahl ist farblich dargestellt. Auf 99,9% der Fläche Deutschlands entfiel in den Jahren 2001 bis 2021 mindestens ein Ereignis. Nahezu alle Rasterpixel der Klasse 1 „Bebaute Fläche“ wurden

Bevölkerungsanzahl pro maximalem SRImean aller Ereignisse in 2001 - 2021

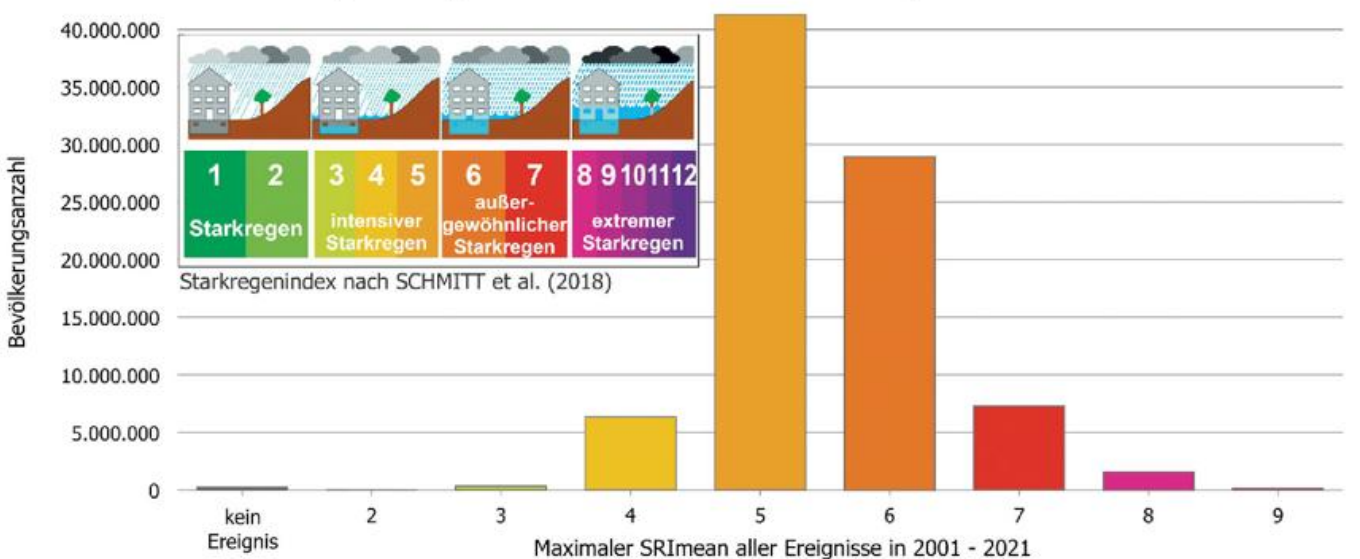


Abbildung 3-5: Anzahl der Bevölkerung, die von mindestens einem Ereignis mit entsprechendem mittlerem Starkregenindex (SRImean) getroffen wurde. SRImean ist dabei der über die Ereignisfläche gemittelte SRI. Die eingebettete Abbildung oben links zeigt die Klassifizierung der Starkregen entsprechend der SRI-Klassen (Datenbasis: CatRaRE_W3_Eta_v2022.01; Zensus2011 (1-km-Raster), © Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2015).

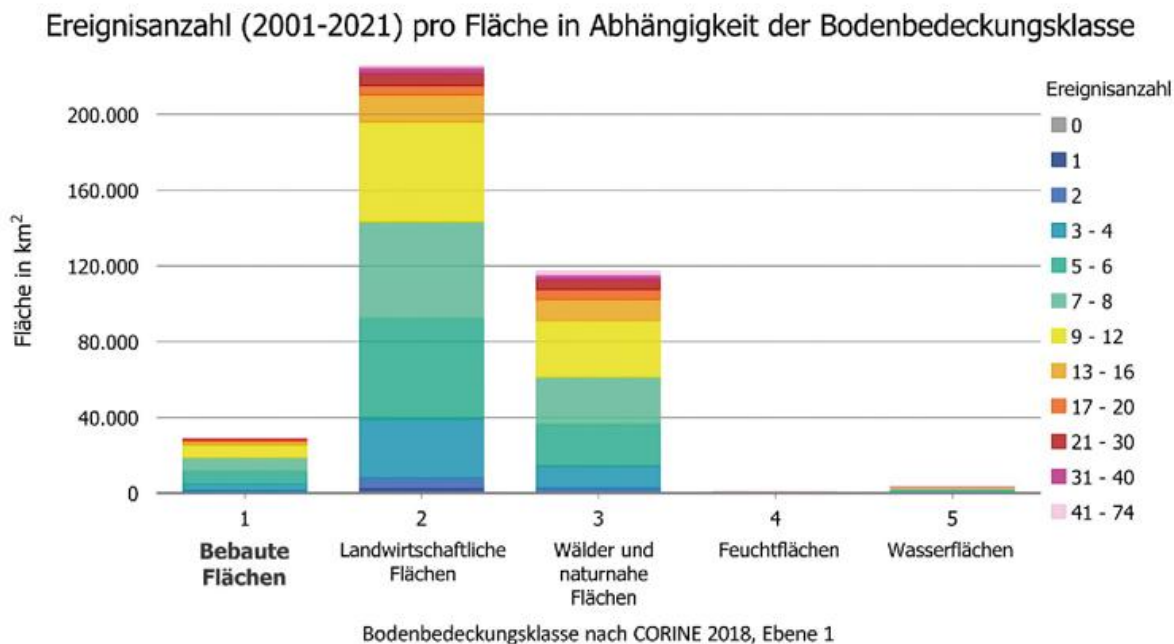


Abbildung 3-6: Anzahl der Ereignisse pro CORINE-Bodenbedeckungsklasse der Ebene 1 in den Jahren 2001 bis 2021 (Datenbasis: CatRaRE_W3_Eta_v2022.01; CORINE LAND COVER 2018 © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2018).

demnach in den Jahren 2001 bis 2021 von mindestens einem Ereignis getroffen. Die gesamte bebaute Fläche nimmt in Deutschland ca. 30.000 km² ein und stellt die drittgrößte der CORINE-Klassen nach den landwirtschaftlichen Flächen sowie den Wäldern und naturnahen Flächen dar.

Trägt man die von extremen Niederschlagsereignissen betroffene bebaute Fläche separat für jedes Kalenderjahr auf (Abb. 3-7), so erkennt man, dass in 2002 die Hälfte der bebauten Fläche mindestens ein Ereignis aufwies. Das vergangene Jahr 2021 liegt in dieser Statistik auf Platz 3 der Jahre 2001 bis 2021.

3.2 Einfluss urbaner Regionen auf den Niederschlag

Urbane Regionen beeinflussen ihrerseits den Niederschlag, wobei verschiedene Effekte eine Rolle spielen (HUFF und CHANGNON 1973, LIU und NIYOGI 2019):

- Thermischer Effekt oberhalb des urbanen Gebiets aufgrund der atmosphärischen Instabilität bedingt durch die städtische Wärmeinsel
- Staueffekte durch die Behinderung des Luftmassenflusses in der Umgebung des urbanen Gebiets zusammen mit erhöhter mechanischer Turbulenz in der unteren Grenzschicht

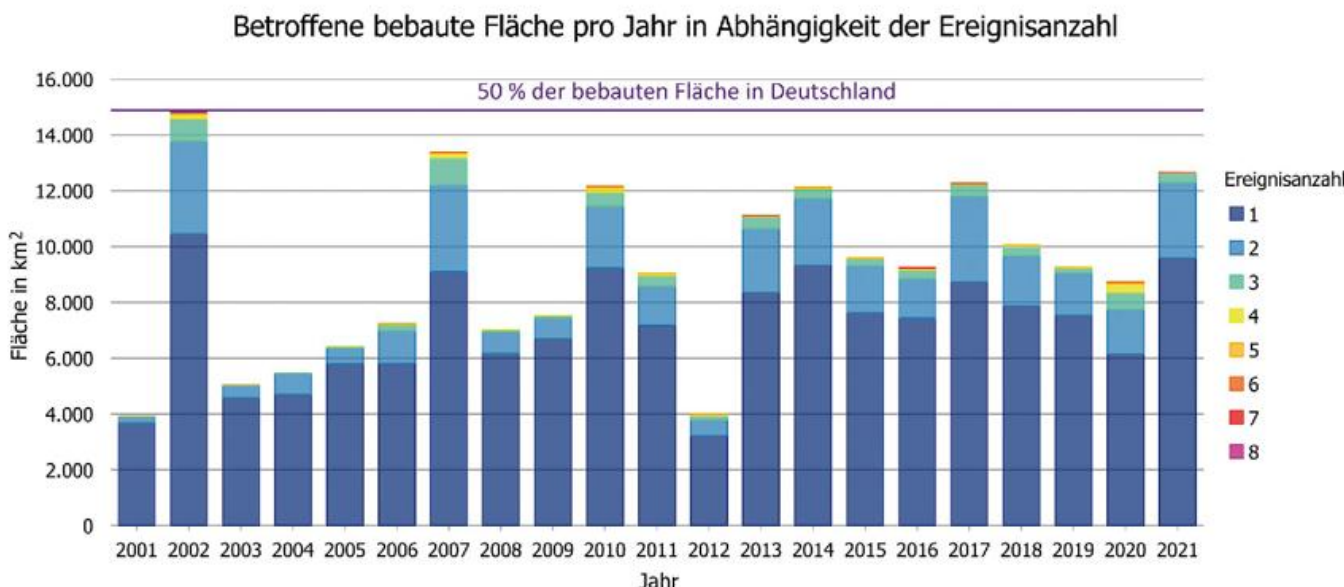


Abbildung 3-7: Von einem extremen Niederschlagsereignis betroffene bebaute Fläche pro Jahr. Die Farbwerte stellen die Ereignisanzahl dar. Die horizontale Linie gibt den halben Flächenwert der bebauten Fläche in Deutschland an (Datenbasis: CatRaRE_W3_Eta_v2022.01; CORINE LAND COVER 2018 © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2018).

- Einflüsse des urbanen Aerosols und der Verschmutzung, die zu Veränderungen der Wärmeprofile, Wolken und mikrophysikalischen Prozesse oberhalb der Stadt führen
- Modifikationen der unteren Grenzschicht bezüglich der Feuchte- und Wärmeeigenschaften ausgelöst durch anthropogene Quellen und Verdunstung auf Grünflächen

Die synergetischen Effekte sind komplex und variabel. Separat betrachtet können diese die Niederschlagsbildung durch intensivierete Konvektion verstärken, aber auch durch die Beeinflussung der Wolkenmikrophysik verzögern oder sogar verhindern. Nach der Metaanalyse von LIU und NIYOGI (2019) beobachten viele Studien eine starke Zunahme des mittleren Niederschlags direkt oberhalb sowie im Lee von Großstädten, während die Einflüsse vor und neben der Stadt gering oder nicht eindeutig sind.

Der klimatologische Nachweis eines Stadteffekts erfordert streng genommen den Vergleich der Niederschlagsverteilung zweier vergleichbarer Regionen mit und ohne urbanen Einfluss. Derartige Beobachtungen sind im dicht besiedelten Deutschland mit starker topografischer Struktur nicht oder nur eingeschränkt möglich. An dieser Stelle wird daher auf die Ergebnisse einer Fallstudie eingegangen, die im Rahmen des Projekts KlamEx durchgeführt wurde (NIKOGOSIAN et al. 2021). Als geeignete Stadt zur Untersuchung eines potenziellen Stadteffekts auf den Starkniederschlag wurde aufgrund der relativ separierten Lage im norddeutschen Flachland die Stadt Bremen ausgewählt. Dazu wurden die Ereignisanzahlen aus CatRaRE in der Umgebung des Stadtgebiets in Abhängigkeit von der Anströmrichtung entsprechend der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD ausgezählt. Die Ergebnisse deuten auf ein erhöhtes Auftreten von Starkregenereignissen kurzer Dauerstufen im Lee der Stadt Bremen hin. Eine Erhöhung der Starkregentätigkeit innerhalb des Stadtgebiets konnte hingegen nicht festgestellt werden. Um diese Beobachtung ursächlich einem klimatologischen Stadteffekt zuzuordnen, sind jedoch umfangreichere Analysen notwendig. Die vollständigen Ergebnisse der Fallstudie sind im Abschlussbericht des Projekts KlamEx (NIKOGOSIAN et al. 2021) publiziert.

4 Daten, Produkte, Tools – Wo finde ich was?

Sowohl die RADKLIM-Daten als auch die Ereigniskataloge CatRaRE stehen zum freien Download zur Verfügung. Die Links zu den Daten wie auch zu weiterführenden Informationen finden sich im Webangebot des DWD unter www.dwd.de/radklim, www.dwd.de/catrare und www.dwd.de/klamex. Bei der Verwendung ist auf die korrekte Referenzierung der Daten zu achten. Begleitend zur Fortschreibung der Daten publiziert der DWD seit 2021 das RADKLIM-Bulletin, das über www.dwd.de/radklim-rss als RSS-Feed abonniert werden kann und auch zum Download bereitsteht. Enthalten sind Standardauswertungen und

-abbildungen des betrachteten Gesamtzeitraums, des vergangenen Jahres sowie die detaillierte Betrachtung eines extremen Niederschlagsereignisses des Vorjahres.

Sowohl HYRAS als auch KOSTRA-DWD stehen ebenfalls im Open-Data-Bereich des DWD zum freien Download zur Verfügung. Die Links zu den Daten wie auch zu weiterführenden Informationen finden sich unter www.dwd.de/DE/leistungen/hyras/hyras.html und www.dwd.de/kostra.

Literatur

- BBK, 2022: Starkregen – Herausforderung für den Bevölkerungsschutz. Trends, Auswirkungen und Handlungsempfehlungen. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Hrsg.), *Praxis im Bevölkerungsschutz* **23**. Abruf am 11.04.2023, URL: <https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-23-starkregen.pdf>.
- FISCHER, F.K., WINTERRATH, T., 2021: Precipitation measurement techniques, typical data sets, and their application in erosion research and extreme value statistics. In: Precipitation – Earth Surface Responses and Processes, RODRIGO-COMINO, J. (Hrsg.), *Elsevier Science*, 147-172.
- HUFF, F.A., CHANGNON, S.A., 1973: Precipitation modification by major urban areas. *Bulletin of the American Meteorological Society* **54**, 1220-1233, doi: 10.1175/1520-0477(1973)054<1220:PMBMUA>2.0.Co;2.
- JUNGHÄNEL, T., BÄR, F., DEUTSCHLÄNDER, T., HABERLANDT, U., OTTE, I., SHEHU, B., STOCKEL, H., STRICKER, K., THIELE, L.-B., WILLEMS, W., 2022: Methodische Untersuchungen zur Novellierung der Starkregenstatistik für Deutschland (MUNSTAR) – Synthesebericht. Abruf am 11.04.2023, URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/Synthesebericht_MUNSTAR.pdf.
- JUNGHÄNEL, T., ERTEL, H., DEUTSCHLÄNDER, T., 2017: KOSTRA-DWD-2010R – Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Abruf am 11.04.2023, URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/bericht_revision_kostra_dwd_2010.pdf.
- KOUTSOYIANNIS, D., KOZONIS, D., MANETAS, A., 1998: A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology* **206**, 118-135, doi: 10.1016/S0022-1694(98)00097-3.
- LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WINTERRATH, T., BECKER, A., 2021: CatRaRE: A Catalogue of radar-based heavy rainfall events in Germany derived from 20 years of data. *Meteorologische Zeitschrift* **30**, 469-487, doi: 10.1127/metz/2021/1088.
- LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WINTERRATH, T., WEIGL, E., BECKER, A., 2022a: Starkregenereignisse Version 2022.01 mit Überschreitung der

DWD-Warnstufe 3 für Unwetter basierend auf RADKLIM-RW Version 2017.002, Parameter und Polygone der Starkregenereignisse in Deutschland. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, doi: 10.5676/DWD/CatRaRE_W3_Eta_v2022.01.

LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WINTERRATH, T., WEIGL, E., BECKER, A., 2022b: Starkregenereignisse Version 2022.01 mit Überschreitung der 5-Jährlichkeit basierend auf RADKLIM-RW Version 2017.002, Parameter und Polygone der Starkregenereignisse in Deutschland. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, doi: 10.5676/DWD/CatRaRE_T5_Eta_v2022.01.

LIU, J., NIYOGI, D., 2019: Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Scientific Reports* **9**, 7301, doi: 10.1038/s41598-019-42494-2.

MÜLLER, M., KASPAR, M., 2014: Event-adjusted evaluation of weather and climate extremes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **14**, 473-483, doi: 10.5194/nhess-14-473-2014.

NIKOGOSIAN, C., WINTERRATH, T., WALAWENDER, E., FISCHER, I., SCHMITZ-KRÖLL, D., WISCHOTT, V., 2021: Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikovorsorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung (KlamEx). Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“.

OKE, T.R., 2006: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. World Meteorological Organization (Hrsg.), *Instruments and observing methods* **81**.

RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A., GRATZKI, A., 2013: A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* **22**, 235-256, doi: 10.1127/0941-2948/2013/0436.

SCHMITT, T., KRÜGER, M., PFISTER, A., BECKER, M., MUDERSBACH, C., FUCHS, L., HOPPE, H., LAKES, I., 2018: Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* **65**, 113-120, doi: 10.3242/kae2018.02.002.

SHEHU, B., WILLEMS, W., STOCKEL, H., THIELE, L., HABERLANDT, U., 2022: Regionalisation of Rainfall Depth-Duration-Frequency curves in Germany. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* **2022**, 1-29, doi: 10.5194/hess-2022-118.

WACKERNAGEL, H., 2003: Multivariate geostatistics: an introduction with applications. *Springer Science & Business Media*.

WINTERRATH, T., BRENDEL, C., HAFER, M., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., WALAWENDER, E., WEIGL, E., BECKER, A., 2017: Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **251**.

WINTERRATH, T., BRENDEL, C., HAFER, M., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WEIGL, E., BECKER, A., 2018: RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed gauge-adjusted radar-data, one-hour precipitation sums (RW). Deutscher Wetterdienst, Offenbach, doi: 10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002.

WMO, 2019: Guidance on Integrated Urban Hydro-meteorological, Climate and Environmental Services – Volume I: Concept and Methodology. Abruf am 11.04.2023, URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9903.

Kontakt

DR. TANJA WINTERRATH
 Deutscher Wetterdienst
 Klima und Umwelt – Hydrometeorologie
 Frankfurter Straße 135
 63067 Offenbach
 tanja.winterrath@dwd.de

THOMAS JUNGHÄNEL, M. SC.
 Deutscher Wetterdienst
 Klima und Umwelt – Hydrometeorologie
 Frankfurter Straße 135
 63067 Offenbach
 thomas.junghaenel@dwd.de

DR. KATHARINA LENGFELD
 Deutscher Wetterdienst
 Klima und Umwelt – Hydrometeorologie
 Frankfurter Straße 135
 63067 Offenbach
 katharina.lengfeld@dwd.de

EWELINA WALAWENDER, M. SC.
 Deutscher Wetterdienst
 Klima und Umwelt – Hydrometeorologie
 Frankfurter Straße 135
 63067 Offenbach
 ewelina.walawender@dwd.de

DIPL.-MET. ELMAR WEIGL
 Deutscher Wetterdienst
 Klima und Umwelt – Hydrometeorologie
 Frankfurter Straße 135
 63067 Offenbach
 elmar.weigl@dwd.de

4

K. SEDLMEIER, B. TINZ

Wind in der Stadt

Urban wind

Zusammenfassung

Wind ist ein wichtiges und gleichzeitig sehr komplexes Element des urbanen Klimas. Die lokalen Windverhältnisse bilden ein Wechselspiel aus großräumigem Windfeld und den lokalen städtischen Gegebenheiten und können innerhalb eines Stadtgebiets große Unterschiede aufweisen. Verschiedenskalige Windsysteme wie Flurwind, Land-/Seewind, Berg-/Talwind oder Regionalwinde (z. B. Alpines Pumpen) können zur Verbesserung oder Verschlechterung der Luftqualität in Städten beitragen. Stürme und Gewitter haben bei hohen Windgeschwindigkeiten in Städten ein großes Schadenspotenzial. Für vereinfachte Annahmen, beispielsweise einzelne Häuser oder gleichmäßig angeordnete Straßenschluchten, lässt sich das Windfeld gut beschreiben. Diese idealen Verhältnisse entsprechen jedoch den wenigsten Städten und können nur als erste Näherung herangezogen werden. Die städtische Morphologie hat einen erheblichen Einfluss auf das lokale Windfeld. Für viele Anwendungen bedarf es daher spezifischeren Untersuchungen, die vor allem durch die Entwicklung der Stadtklimamodelle in den letzten Jahren immer besser und realistischer wurden.

Summary

Wind is an important and at the same time very complex element of urban climates. Local wind conditions form an interplay between the large-scale wind field and local urban conditions, and can vary greatly within urban areas. Wind systems on different scales, such as land/sea circulations, mountain/valley circulations, or regional systems (e.g. Alpine pumping) can contribute to the improvement or deterioration of air quality in cities. On the other hand, storms/thunderstorms with high wind speeds have a large damage potential in cities. For simplified assumptions, e.g. detached and uniform buildings or uniformly arranged street canyons, the wind field is well understood, but these ideal conditions correspond rarely with real cities and can only be used as a first-order assumption. Urban morphology has a considerable influence on the local wind field. For many applications, therefore, more specific studies are needed which are becoming better and more realistic, especially due to the development of urban climate models in recent years.

1 Einleitung

Wind ist ein wichtiges Element des urbanen Klimas und äußerst relevant für die Stadt- und Gebäudeplanung. Luftverunreinigung und thermische Belastung im Stadtgebiet sind zwei wichtige Beispiele, bei denen die Windverhältnisse direkt die Lebensqualität in der Stadt beeinflussen. Letztendlich ist der Wind auf jeder Skala immer das Resultat der regionalen Windverhältnisse und deren Wechselwirkung mit den Hindernissen einer Stadt, die durch Bebauung und Vegetation charakterisiert wird. Windverhältnisse und Windeffekte unterscheiden sich allerdings stark, je nachdem, welche räumliche Skala betrachtet wird. So treten auf der gesamtstädtischen Ebene andere Effekte auf als innerhalb eines Stadtbezirks oder auf der Gebäudeebene.

Auf der regionalen Skala haben großräumige Windsysteme einen großen Einfluss auf die Stadt, insbesondere Stürme besitzen ein hohes Schadenspotenzial und können an den Küsten neben direkten Windschäden Sturmfluten verursachen. Aufgrund der dichten Besiedelung und der komplexen Infrastruktur folgt, dass Städte gegenüber Starkwindereignissen viel vulnerabler sind als das Umland.

In Abschnitt 2 werden zunächst die regionalen Windverhältnisse in Deutschland aufgezeigt, gefolgt von einer Beschreibung des urbanen Windfelds auf den verschiedenen räumlichen Skalen (Abschnitt 3). Abschnitt 4 stellt zuletzt einige praktische Anwendungen vor, für die das städtische Windfeld wichtig ist, wobei als Beispiel die Durchlüftung der Stadt München herangezogen wird.

2 Wind und Stürme in Deutschland

Wind ist bewegte Luft, der durch Luftdruckunterschiede an der Erdoberfläche entsteht. Im Zusammenspiel von Druckgradientkraft, Corioliskraft, Schwerkraft und Reibung ergeben sich die großräumigen Windfelder (HUPFER und KUTTLER 2006, SCHÖNWIESE 2020).

Deutschland liegt in den mittleren Breiten und somit in der Westwinddrift, in der Tiefdruckgebiete vom Nordatlantik ostwärts ziehen und für wechselhaftes Wetter sorgen. Entsprechend des Luftdruckunterschiedes zwischen Azorenhoch und Islandtief sind die Windgeschwindigkeiten im Winter höher als im Sommer und die Sturmsaison fällt in die kalte Jahreszeit. Zeitweise bilden sich quasistationäre Hochdruckgebiete aus, in deren Bereich die Windgeschwindigkeit oft unterdurchschnittlich ist.

In Deutschland treten die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten an den Küsten von Nord- und Ostsee sowie auf exponierten Gipfeln der Mittelgebirge und der Alpen auf. Relativ hoch sind die Windgeschwindigkeiten ebenfalls in der Norddeutschen Tiefebene, während in Talagen der Mittelgebirge und Süddeutschlands deutlich geringere mittlere Windgeschwindigkeiten auftreten.

Die dominierende Windrichtung in Deutschland ist Südwest bis West. Ein sekundäres Maximum zeigt die Windrichtungsverteilung bei Ost, häufig im Frühjahr. Relativ selten weht der Wind aus Richtung Nord.

Modifiziert wird das regionale Windfeld durch die Struktur der Erdoberfläche. Offene Gebiete wie Wasser- oder Sandflächen setzen dem Wind in Bodennähe nur wenig Widerstand entgegen, während Wälder oder Siedlungsgebiete für eine deutliche Abnahme der Windgeschwindigkeit in der Nähe des Erdbodens sorgen. Beschrieben werden kann dieser Effekt mit der Rauigkeitslänge z_0 . Städte haben eine hohe Rauigkeitslänge ($z_0 = 0,8\text{--}2\text{ m}$ im Innenstadtbereich bei Hochhäusern $>2\text{ m}$ im Vergleich zu $0,01\text{--}0,15\text{ m}$ bei offenen Flächen und Feldern, OKE et al. 2017).

Des Weiteren gibt es auf der lokalen Ebene kleinräumige Windsysteme, die sich im Tagesgang durch die unterschiedliche Erwärmung verschiedenartiger Oberflächen einstellen. Dazu gehört an den Küsten und größeren Seen das Land-See-Windsystem, in den Gebirgen der Berg-/Talwind und Kaltluftabflüsse sowie im Bereich von Städten die Flurwinde (siehe Abschnitt 3.1).

Auf der 13-teiligen Beaufort-Skala entspricht Sturm der Windstärke 9 (75–88 km/h). Die Windstärken 10 (schwerer Sturm) und 11 (orkanartiger Sturm) liegen darüber. In der Praxis wird oft die Windstärke 8 (stürmischer Wind, 62–74 km/h) zum Sturm hinzugezählt. Das betrifft zum Beispiel die Wetterwarnungen des DWD. Dabei wird sich, gemäß den Vorschriften der Weltorganisation für Meteorologie (WMO), immer auf die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 m über Grund bezogen (JARRAUD 2008).

Eine Windstärke von 8 Bft stellt die Untergrenze für windbedingte Versicherungsfälle dar. Ursprünglich wurde die Beaufort-Skala für die (Segel-)Schifffahrt eingeführt und bezieht sich auf die mittlere Windgeschwindigkeit. An Land sind die Windspitzen/Böen von Belang, von denen das größte Schadenspotenzial ausgeht.

Hohe Windgeschwindigkeiten treten während des Durchzugs außertropischer Tiefdruckgebiete auf. Davon betroffen ist häufig Norddeutschland, insbesondere die Küstennähe. Diese relativ großräumigen Tiefdruckgebiete kommen überwiegend im Winterhalbjahr vor. Im Sommer sind es Gewitter, in deren Bereich Orkanböen auftreten können. Diese sind räumlich deutlich kleiner und betreffen oft nur einzelne Regionen. Noch höhere Windgeschwindigkeiten können in der direkten Umgebung von Tornados auftreten. Diese kommen auch in Deutschland vor und können deutliche Zerstörungen anrichten. Ein Beispiel ist der bekannte „Pforzheim-Tornado“ am 10. Juli 1968 (BISSOLLI et al. 2007).

3 Wind in der Stadt

Das Windfeld in einer Stadt wird beeinflusst von den regionalen Windverhältnissen, unterscheidet sich aber, wie auch die anderen meteorologischen Parameter, von dem im Umland. Diese Differenzen entstehen durch eine erhöhte Rauigkeit durch Bebauung, erhöhte Oberflächenerwärmung aufgrund der städtischen Wärmeinsel sowie durch Änderungen in der Entwicklung der atmosphärischen Grenzschicht (DROSTE et al. 2018, KUTTLER und GROSS 2023).

Im Mittel ist die Windgeschwindigkeit auf gleicher Höhe über Grund in der Stadt im Vergleich zum Umland reduziert. So berichten KUTTLER et al. (2015) in einer Studie in Essen über eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit bei zunehmender Rauigkeitslänge und abnehmendem Himmelssichtfaktor (Verhältnis von realer zur maximal möglichen Himmelssicht; engl. *sky view factor*). SORIANO et al. (2001) fanden zum Beispiel eine Reduktion der Windgeschwindigkeit von bis zu 40 % bei Vergleichsmessungen zwischen Stadt und Umland. Auch zeigt sich in der Stadt ein häufigeres Auftreten von Windstillen und eine höhere Anzahl an Schwachwindstunden (KÖPKE et al. 2000, KUTTLER 2004).

Unter bestimmten Bedingungen kann der mittlere Wind in der Stadt jedoch höher sein als im Umland. (DROSTE et al. 2018, HUPFER und KUTTLER 2006, KUTTLER 2004). DROSTE et al. (2018) führen das überwiegend am Nachmittag auftretende Phänomen auf eine Kombination der Unterschiede von Oberflächenrauigkeit, Wachstum der atmosphärischen Grenzschicht und dem ageostrophischen Wind zwischen Stadt und Land zurück.

Für das menschliche Wohlbefinden in der Stadt spielen Windgeschwindigkeit und thermische Verhältnisse eine Rolle (VDI 2020). Während niedrige Windgeschwindigkei-

ten generell eine mangelnde Durchlüftung zur Folge haben können kann es bei hohen Lufttemperaturen zu einer Überhitzung kommen. Hohe Windgeschwindigkeiten stellen hingegen eine Gefahr dar und bei gleichzeitig niedrigen Temperaturen besteht die Gefahr einer Auskühlung.

Die Reduktion der Windgeschwindigkeit im urbanen Raum wird deutlich bei der Trendbetrachtung von Klimadaten an Standorten, die im Laufe der Zeit immer stärker urbanisiert wurden. PENG et al. (2018) haben die Entwicklung der Windgeschwindigkeit von vier meteorologischen Stationen in Hongkong in Abhängigkeit von den morphologischen Gebäudeparameter untersucht. Sie erklärten die Reduktion der mittleren Windgeschwindigkeit um ca. 67% zwischen 1964 und 2010 mit der Veränderung der urbanen Entwicklung und der Vergrößerung der Gebäudehöhe. Auch ZHANG et al. (2022) fanden bei ihrer Untersuchung der Trends von Windspitzen im Yangtze River Delta in China zwischen 1990 und 2015 die größten negativen Trends in Gegenden mit höchster Urbanisierungsrate.

Auch das vertikale Windprofil in der Stadt ist verändert gegenüber dem des Umlands (Abb. 4-1), die Reduktion der Windgeschwindigkeit ist in allen Höhenlagen zu beobachten. Da die mechanische Turbulenz in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit steigt, zeichnet sich das städtische Windfeld durch eine höhere mechanische Turbulenz und Böigkeit aus (eine Übersicht über stadtbedingte Turbulenz findet sich z. B. in ROTH 2000). Dies hat zur Folge, dass mehr Durchmischung zwischen den verschiedenen Schichten stattfindet und damit einhergehend der vertikale Gradient der Windgeschwindigkeit abnimmt. Die Differenzen der Windgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Höhenstufen sind in der Stadt somit viel geringer als in der Umgebung und Geschwindigkeiten des unbeeinflussten Gradientenwindes werden in einer viel größeren Höhe erreicht als im Umland (vgl. die Werte bei 100% normierter Windgeschwindigkeit in Abb. 4-1).

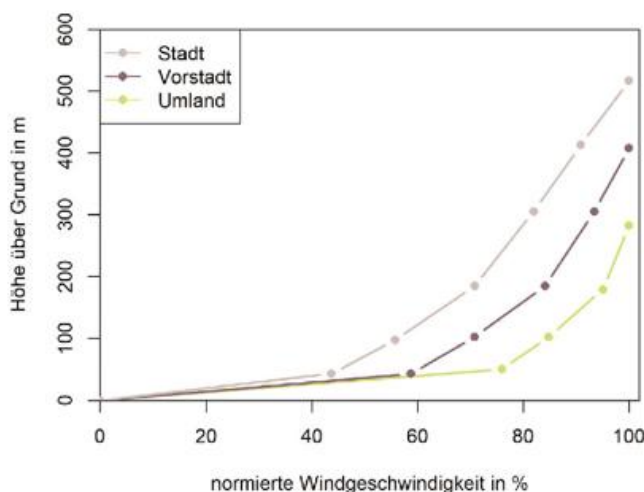


Abbildung 4-1: Vertikale Windprofile für Oberflächen verschiedener Rauigkeit bei neutral geschichteter Atmosphäre. Die Windgeschwindigkeit ist normiert auf den unbeeinflussten Gradientenwind (nach HENNINGER und WEBER 2019; Daten aus OKE 1997).

Im Folgenden werden die Strömungsmuster für zwei verschiedene Skalen ausführlicher betrachtet, zunächst die thermisch bedingten Strömungsmuster auf der gesamtstädtischen Ebene und anschließend die Beeinflussung der Windverhältnisse durch die städtische Bebauung.

3.1 Strömungsmuster auf Stadtebene

Neben Starkwindereignissen wie durch Stürme und Gewitter sind es vor allem thermische Windsysteme, die – durch einen Luftaustausch zwischen Stadt und Umgebung oder auch innerhalb des Stadtgebiets – das Strömungsmuster auf Stadtebene beeinflussen. Dies geschieht in der Regel bei autochthonen Witterungsverhältnissen, das heißt bei wolkenarmen, schwachwindigen Großwetterlagen. Durch die städtische Wärmeinsel kann eine thermische Zirkulation induziert werden, ähnlich zu einem Land-See-Windsystem. Dieses, als Flurwind bezeichnete Windsystem, transportiert bodennah kühlere Luftmassen aus dem Umland in das Stadtgebiet. In der Höhe findet sich eine Gegenströmung von der Stadt in Richtung Umland, die auch zu Schadstofftransport in das Umland führen kann. Auch zwischen Grünflächen innerhalb des Stadtgebiets und dicht bebauten Bereichen können diese Effekte auftreten (KUTTLER und GROSS 2023).

Liegen Städte in oder in der Nähe von orographisch gegliedertem Gelände, können zudem Berg- und Talwindzirkulationen und die damit verbundenen Hangwinde die Windverhältnisse im Stadtgebiet beeinflussen. Ein Beispiel hierfür ist die Durchlüftung von München durch das großräumige Alpine Pumpen (siehe Abschnitt 4.1). Aber auch in Städten in der Nähe von Mittelgebirgen spielen lokale Berg- und Talwindssysteme eine Rolle, wie der Wisperwind im Taunus oder der „Höllentäler“ in Freiburg (z. B. www.dwd.de/lexikon). Die nächtlichen Kaltluftflüsse können eine positive Wirkung auf das Stadtklima haben und zur Durchlüftung beitragen. Die Geschwindigkeit und Ausdehnung der Kaltluftflüsse ist dabei abhängig von den orographischen Gegebenheiten. Mittlere Windgeschwindigkeiten liegen zwischen 0,5 und 2 m s⁻¹ mit Ausdehnungen von wenigen Metern, bei starker Geländegliederungen können allerdings auch Windgeschwindigkeiten von über 5 m s⁻¹ und Ausdehnungen im Bereich von 100 m erreicht werden. Zur Berechnung der Kaltluftbildung kann zum Beispiel das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des DWD (SIEVERS 2005) verwendet werden.

Die oben erwähnten thermischen Windsysteme können jedoch durch Strömungshindernisse beziehungsweise die urbane Rauigkeit schnell zum Erliegen kommen. Um die positive Wirkung der lokalen Windsysteme auf die Stadt zu gewährleisten, müssen Luftleitbahnen in der Stadtplanung mit einbezogen werden. Dies sind Freiflächen, die den Transport der Luftmassen vom Umland in die Stadt begünstigen und die sich, je nach thermischen und lufthygienischen Eigenschaften, in drei Kategorien unterteilen lassen (MAYER 1994):

- Ventilationsbahn: Luftleitbahn mit unterschiedlichem thermischem und lufthygienischem Niveau
- Frischluftbahn: Luftleitbahn mit unterschiedlichem thermischem Niveau aber ohne Schadstoffemissionen
- Kaltluftbahn: Luftleitbahnen mit vergleichsweise kühleren Luftmassen mit unterschiedlichem lufthygienischem Niveau

Auch die Anforderungen an stadtklimarelevante Luftleitbahnen werden in MAYER (1994) erläutert und sind wichtiger Bestandteil der Stadtplanung (BAUMÜLLER und KATZSCHNER 2023).

3.2 Strömungsmuster auf Gebäudeebene

Das bodennahe Windfeld innerhalb eines Stadtgebiets ist keinesfalls homogen, sondern sehr komplex und stark beeinflusst von den städtischen Gegebenheiten wie der Bebauungsdichte, der Höhenverteilung der Bebauung, der Gebäudegeometrie, dem Verhältnis von Gebäudehöhe H zu Abstand der Gebäude W (H/W -Verhältnis, engl. *aspect ratio*). Hinzu kommt der Einfluss der Vegetation (Wiesen, Parks und Bäume) auf das Windfeld.

Obwohl die Interaktion von Wind und den städtischen Hindernissen komplex ist, lassen sich unter bestimmten Annahmen und Vereinfachungen typische Strömungsregimes in der Stadt ausmachen, die gut untersucht und verstanden sind. Eine umfangreiche Übersicht findet man zum Beispiel in OKE et al. (2017). Einige wichtige Strömungsmuster werden im Folgenden vorgestellt.

In Abhängigkeit von der Bebauungsdichte, das heißt dem H/W -Verhältnis, gibt es vereinfacht drei Arten von Strömungsregimes bei senkrechter Anströmung gleichmäßig angeordneter Gebäude (Abb. 4-2):

- Strömung um isolierte Einzelgebäude (engl. *isolated roughness flow*, Abb. 4-2a): Wenn der Abstand zwischen den Gebäuden relativ groß ist ($H/W < 0,3 - 0,5$), ähnelt das Strömungsmuster dem von einzelnstehenden Gebäuden. Auf der windzugewandten Seite entsteht ein Überdruck und die Strömung wird nach oben und zu den Seiten abgelenkt und beschleunigt (Verdrängungsbereich, engl. *displacement zone*). Dadurch entsteht direkt über und hinter dem Gebäude eine Zone mit verringertem Druck, in dem sich Wirbel ausbilden (Wirbelzone, engl. *cavity*). Im weiteren Strömungsverlauf werden wieder ungestörte Bedingungen erreicht (Nachlaufzone, engl. *wake*). Je nach Abstand zwischen den Gebäuden werden nachfolgende Gebäude von dem bereits veränderten Windfeld mehr oder weniger stark beeinflusst.
- Gestörte Nachlaufströmung (engl. *wake interference flow*, Abb. 4-2b): Für H/W -Verhältnisse zwischen 0,35 und 0,65. Wenn der Abstand zwischen den Gebäuden kleiner wird, überlagern sich die Nachlaufzone des ersten und der Verdrängungsbereich des dahinterliegenden Gebäudes. Dadurch werden die Wirbel verstärkt und die Turbulenzintensität im Bereich zwischen den Gebäuden nimmt zu. Die mittlere Windgeschwindigkeit ist in diesem Fall normalerweise geringer als beim erst genannten Fall.
- Überstreichende Strömung (engl. *skimming flow*, Abb. 4-2c): Bei noch geringeren H/W -Verhältnissen ($H/W > 0,65$) überstreicht (engl. *skimming*) die Strömung die Dächer und dringt kaum in die Gebäudewenräume ein. Durch die Ablenkung dieser Strömung entsteht eine schwache tangential Kraft, die zu einer Rotorzirkulation im Zwischenraum der Gebäude führt. Die Windgeschwindigkeit innerhalb der Zwischenräume ist dabei stark herabgesetzt.

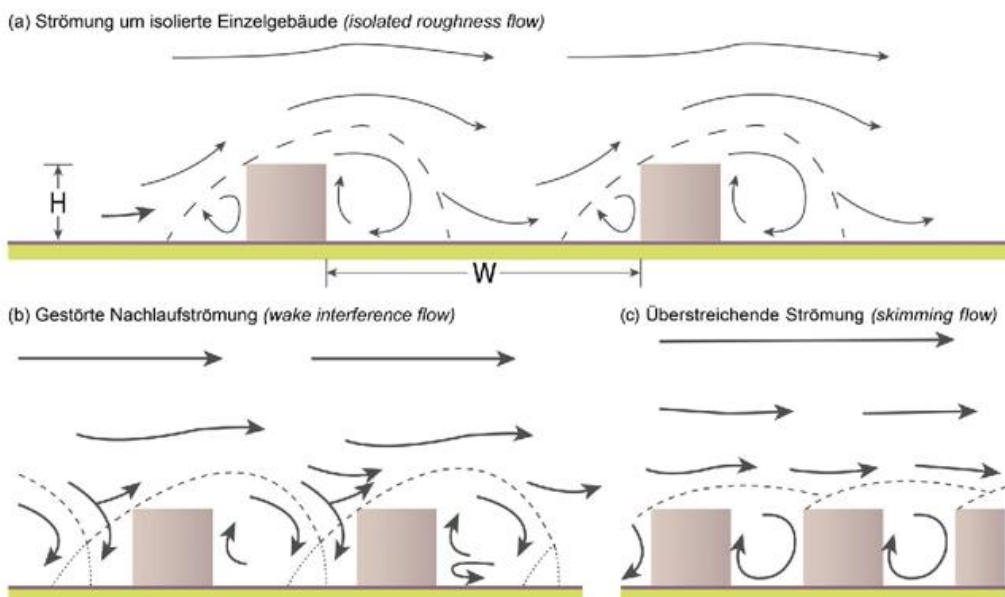


Abbildung 4-2: Typische Strömungsregimes innerhalb der UCL (Urban Canopy Layer) in Abhängigkeit vom H/W -Verhältnis (Verhältnis von Gebäudehöhe H zum Abstand der Gebäude W ; nach OKE et al. 2017).

Ein besonders gut untersuchtes Phänomen sind die Windverhältnisse in Straßenschluchten (engl. *street canyons*), die für viele Anwendungen von großer Bedeutung sind (siehe Abschnitt 4). Durch dichte Bebauung werden die Hauptwindrichtungen oft durch den Straßenverlauf vorgegeben. Dies lässt sich gut am Beispiel der Stadtklimastation in Hannover-Weidendam (Nordstadt) zeigen. Durch die Straßenzüge und die Bebauung in unmittelbarer Umgebung der Stadtklimastation ist das Windfeld deutlich modifiziert (Abb. 4-3). Es dominieren Ost- und Nord-

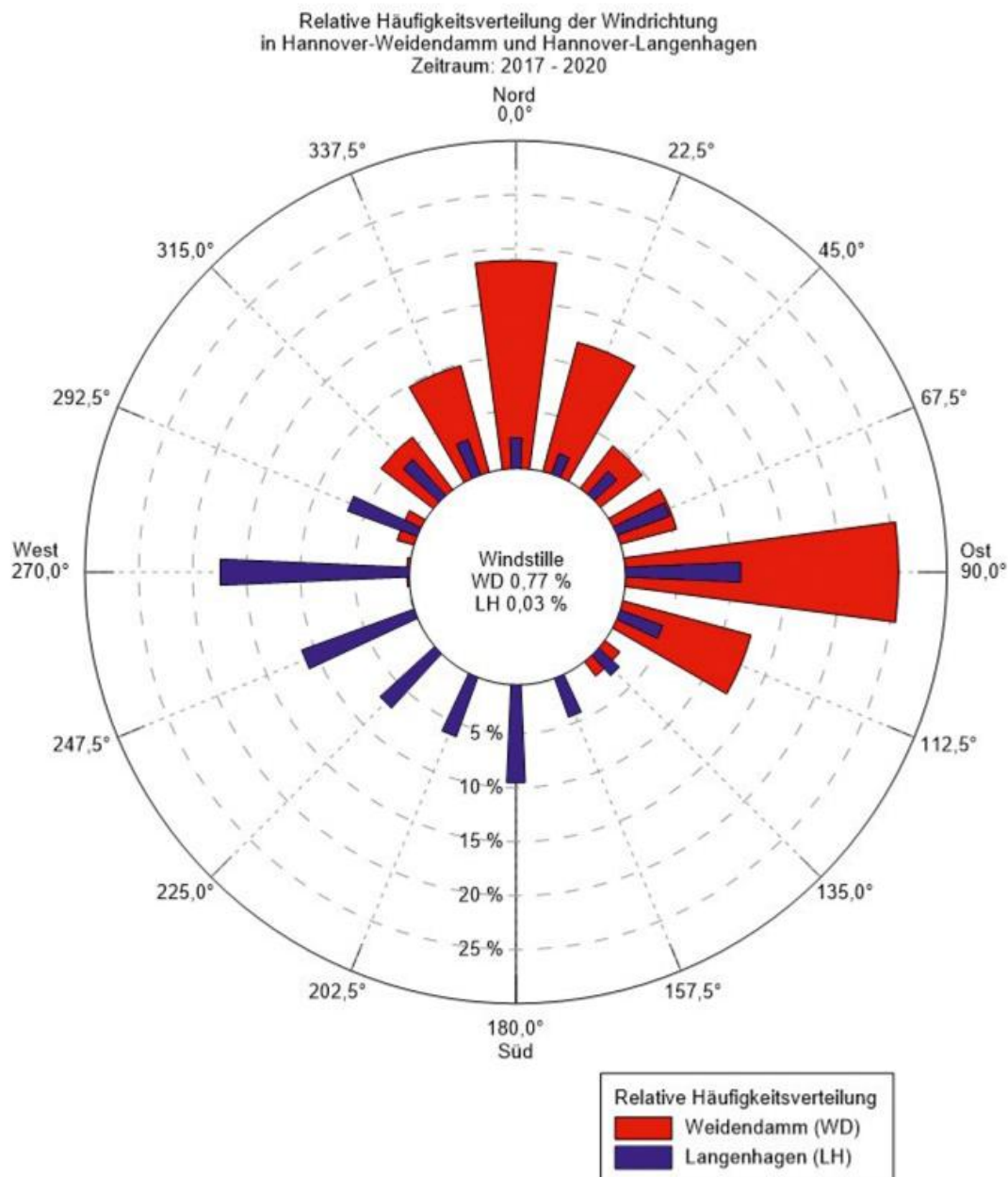


Abbildung 4-3: Windrichtungsverteilung der Stadtklimastation Hannover-Weidendamms (WD, rot), Messhöhe 2 m über Grund, und der Umlandstation Flughafen Hannover-Langenhagen (LH, blau), Messhöhe 10 m über Grund. Zeitraum: 06/2017–12/2020 (DWD 2023b).

winde, während die unter ungestörten Bedingungen (Vergleichsstation Flughafen Hannover-Langenhagen vorherrschenden west- bis südwestlichen Windrichtungen praktisch kaum auftreten (DWD 2023b).

Die Windverhältnisse in Straßenschluchten hängen dennoch stark von der Anströmrichtung ab und die Windgeschwindigkeiten können sowohl erhöht als auch vermindert werden (OKE et al. 2017 und Abb. 4-4). So wird bei senkrechter Anströmung generell die Windgeschwindigkeit innerhalb der Straßenschlucht verringert (Abb. 4-4a). In der Wirbelzone des zum Wind zugewandten Gebäudes entsteht ein Rotationswirbel. Dieser ist stärker bei starken Winden und bei *H/W*-Verhältnissen, bei denen eine gestörte Nachlaufströmung auftritt (siehe Abb. 4-2b und beschreibenden Text). Wenn das *H/W*-Verhältnis sehr groß ist, wird der Hauptwirbel abgeschwächt und es bilden sich eine oder mehrere sekundäre

Zellen in Richtung Boden (Abb. 4-4b). Diese rotieren in entgegengesetzter Richtung und die Rotationsgeschwindigkeit nimmt in Richtung Boden ab. Bei senkrechter Anströmung ist somit die Reduktion der Windgeschwindigkeit am höchsten. Diese kann bis zu 60%–80% betragen (HENNINGER und WEBER 2019 und darin enthaltene Quellen).

Bei Anströmrichtungen kleiner als 30° zur Hauptachse der Straßenschlucht können sich die Wirbel innerhalb dieser auflösen und die Strömung wird kanalisiert (engl. *channeling*, Abb. 4-4c). Der Grenzwinkel ab wann dies geschieht, ist abhängig von der Länge der Straßenschlucht und deren *H/W*-Verhältnis. Am Anfang der Schlucht führt die Verengung zu einer Beschleunigung der Strömung und es entsteht ein Strahlstrom bzw. eine Düsenströmung (engl. *jetting flow*). Bei nahezu paralleler Anströmrichtung wird die Windgeschwindigkeit innerhalb der Straßenschlucht also erhöht.

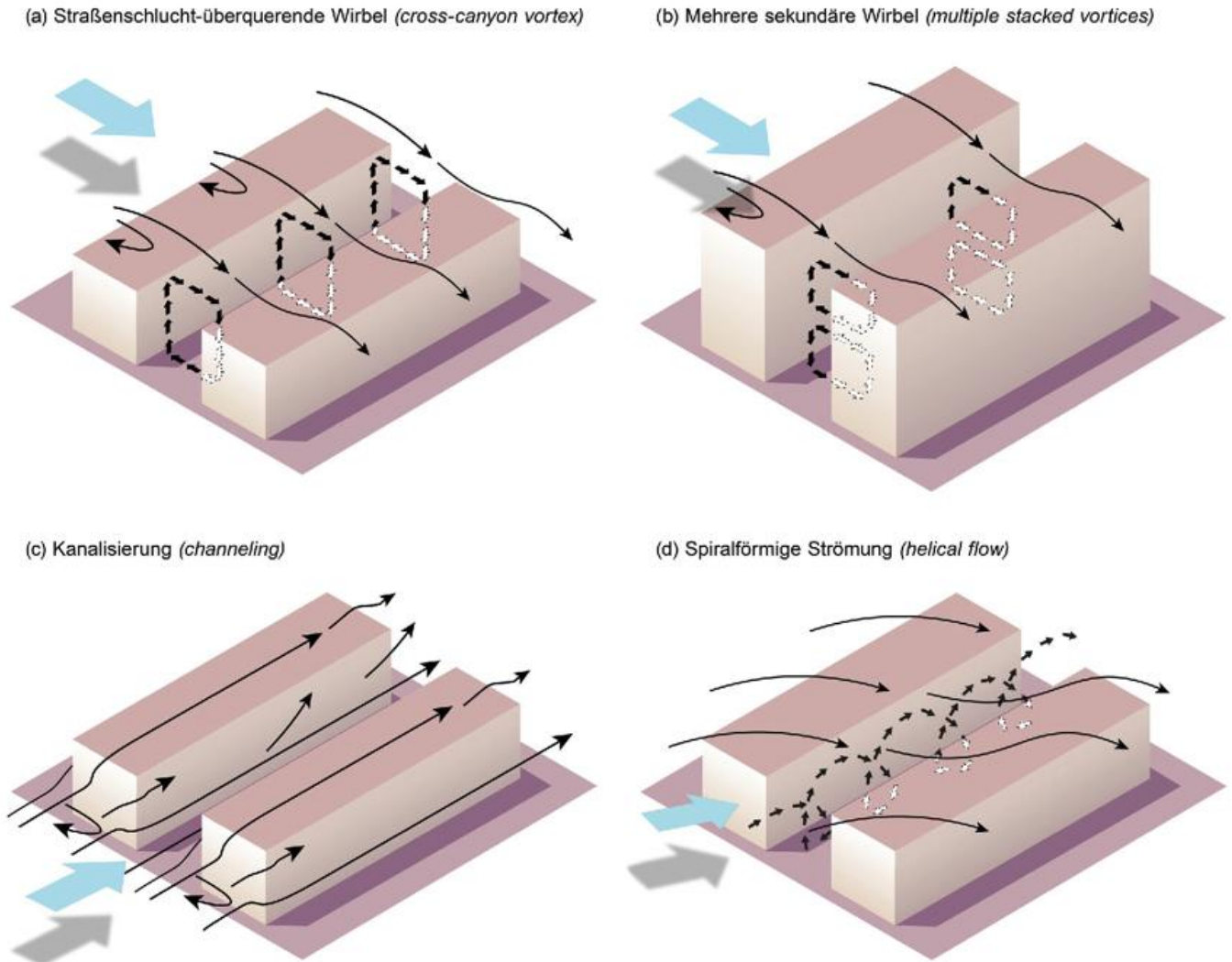


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Strömungsregimes in Straßenschluchten (nach OKE et al. 2017).

Bei Anströmrichtungen von ca. 45° besteht die resultierende Strömung aus der Vektorsumme der kanalisiertem Strömung und den Wirbeln innerhalb der Straßenschlucht (Abb. 4-4d). Hieraus generiert sich eine helixförmige Bahn: Der Wind strömt nunmehr spiralförmig die Straßenschlucht entlang (engl. *helical flow*). Die Reduktion der Windgeschwindigkeit gegenüber der des anströmenden Windes ist hier nicht so stark verringert wie bei senkrechter Anströmung. Oberhalb des Dachniveaus haben die durch die Bebauung verursachten Reibungseffekte einen abnehmenden Effekt auf die Windgeschwindigkeit.

Die vorgenannten Betrachtungen sind stark generalisiert. In der Realität sind die wenigsten Gebäude und Straßen uniform, sondern Gebäudehöhe und -geometrie variieren genauso wie der Straßenverlauf und dessen Breite. Hinzu treten Strömungshindernisse wie Bepflanzung und Topologie der Gebäude (z. B. Innenhöfe).

So wird dem Einfluss der Dachgeometrie auf die Wirbelbildung und Strömungsdynamik in Straßenschluchten zum Teil eine mindestens genauso große Bedeutung zugerechnet wie dem H/W -Verhältnis (BADAS et al. 2021, KASTNER-KLEIN et al. 2004, KLUKOVÁ et al. 2021, LLAGUNO-

MUNITXA und BOU-ZEID 2018, RAFAILIDIS 1997). KASTNER-KLEIN et al. (2004) konnten zum Beispiel zeigen, dass Giebedächer die Geschwindigkeitsreduktion in Straßenschluchten verstärken und der Austausch zwischen der Atmosphäre und der Stadthindernisschicht (engl. *Urban Canopy Layer, UCL*) noch stärker geschwächt wird. In einem Vergleich verschiedener Dachgeometrien und Gebäude mit Balkonen fanden LLAGUNO-MUNITXA und BOU-ZEID (2018) eine deutlich verbesserte Ventilation für runde Dächer im Vergleich zu Flachdächern und eine deutliche Verschlechterung beim Vorhandensein von Balkonen. Auch die Höhenverteilung, Gebäudeform und Gebäudeanordnung beeinflussen das Windfeld (BUCCOLIERI et al. 2011, CARPENTIERI und ROBINS 2015, DA SILVA et al. 2021, GU et al. 2011, HAGISHIMA et al. 2009, NOSEK et al. 2022, NOSEK et al. 2016, NOSEK et al. 2017, YANG et al. 2016).

Vegetation modifiziert ebenso die Windverhältnisse (PAULEIT et al. 2023). Studien über alleinartige Baumpflanzung in Straßenschluchten zeigten generell eine Verminderung der Windgeschwindigkeit sowie der Turbulenzintensität und somit eine Behinderung des Luftaustauschs zwischen Straßenschlucht und Umgebung (BUCCOLIERI

et al. 2011, GROMKE 2009). Dies kann einen erheblichen Einfluss auf die natürliche Belüftung im Straßenraum haben, aber auch dazu genutzt werden, ungewünschte Kanalisierungseffekte zu verringern.

Zusätzlich zur bebauungsbedingten Turbulenz wird auch durch den Verkehr in den Straßenschluchten Turbulenz induziert (engl. *traffic-produced turbulence*, DI SABATINO et al. 2003, KASTNER-KLEIN et al. 2000, KASTNER-KLEIN et al. 2003).

Die in Abbildung 4-4 vereinfacht dargestellten Betrachtungen berücksichtigen nicht die endliche Länge von Straßenschluchten sowie deren Anordnung im städtischen Raum. An den Enden von Straßenschluchten, also an Kreuzungen, Plätzen oder auch Grünanlagen, treffen verschiedene Strömungsregimes aufeinander und es können komplexe dreidimensionale Windstrukturen entstehen (CARPENTIERI et al. 2012, NOSEK et al. 2017, OKE et al. 2017). An den Enden der Straßen bilden sich beispielsweise oft horizontale Eckwirbel (engl. *corner vortices*), die zusätzliche Turbulenz erzeugen (NOSEK et al. 2017, OKE et al. 2017, POL und BROWN 2008).

Zudem wird in vielen vereinfachten Darstellungen und Studien eine neutrale Schichtung angenommen. In der Realität ist dies aber nicht immer gegeben, zum Beispiel durch thermische Effekte oder anthropogene Einflüsse. Die Erwärmung von Gebäudefassaden oder des Bodens führt zu konvektiver Zirkulation. Die dadurch entstehenden Auftriebskräfte können die Wirbelbildung in einer Straßenschlucht stark beeinflussen und stärkere turbulente Flüsse auf Dachebene hervorrufen (MAGNUSSON et al. 2014, PARK und BAIK 2013, PARK et al. 2012)

Die oben erwähnten vereinfachten Betrachtungen können somit erste Anhaltspunkte für die Abschätzung der Windverhältnisse in der Stadt geben. Für spezifische Fragestellungen ist aber meist eine genauere Betrachtung der lokalen Gegebenheiten unerlässlich, da das Windfeld von vielen Faktoren abhängig ist. Die dafür infrage kommenden Methoden werden in FOKEN et al. (2023) genauer erläutert.

4 Auswirkung des Windes in der Stadt

Das wohl meistuntersuchte Thema in Verbindung mit Wind in der Stadt sind Fragestellungen der Durchlüftung. Dies beinhaltet Fragen zur Luftqualität und Schadstoffverteilung (KASTNER-KLEIN et al. 2004, KLUKOVÁ et al. 2021 und darin enthaltene Referenzen, KURPPA et al. 2018, NOSEK et al. 2016, NOSEK et al. 2017, VARDOULAKIS et al. 2003, YAZID et al. 2014, WURZLER et al. 2023). Vor allem in den bodennahen Bereichen von Straßenschluchten finden sich oft hohe Schadstoffkonzentrationen, zum einen durch eine schwache Vermischung der Luft innerhalb der Straßenschlucht mit der über dem Dachniveau und zum anderen durch die

hohen Emissionsraten durch den Kfz-Verkehr. Des Weiteren spielt die Durchlüftung eine wichtige Rolle für das thermische Wohlbefinden (GHASEMI et al. 2015, GROSS 2019, REN et al. 2018, MATZARAKIS 2023). Durch die städtische Wärmeinsel kann die thermische Belastung im Stadtgebiet höher sein und die Belüftung durch Frischluftschneisen ist ein wichtiger Faktor. Dies spielt vor allem mit den in Abschnitt 2 erwähnten lokalen Windsystemen eine Rolle. Ein Beispiel für die Stadt München wird in Abschnitt 4.1 näher erläutert. Eine umfangreiche Übersicht über verschiedene Fragestellungen der Durchlüftung gibt PENG et al. (2020).

Ein weiteres Thema von Interesse für die Stadtplanung, das ebenfalls mit der Durchlüftung zusammenhängt, ist der Windkomfort auf Fußgängerebene (GHASEMI et al. 2015, GROSS 2014, JOHANSSON und YAHIA 2020, MITTAL et al. 2018). Vor allem in kälteren Klimazonen wirken sich meist kalte Luftströme negativ auf das Klima auf Fußgängerebene aus. Neben Kanalisierungseffekten fanden JOHANSSON und YAHIA (2020) vor allem an größeren öffentlichen Räumen, wie an Plätzen und im Uferbereich, Windbeschleunigungen, die zu unangenehmen Verhältnissen für Fußgänger führten. Durch Ablenkung an hohen Gebäuden werden zudem die höheren Windgeschwindigkeiten aus dem oberen Bereich eines Gebäudes auf das Bodenniveau abgelenkt, was mit turbulenten Böen einhergeht. Dies ist besonders relevant bei Starkwindereignissen (VDI 2020).

Durch die komplexe Geometrie einer Stadt weist das Windfeld eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität sowie eine starke Turbulenz auf, was bei Sturm zu Böenspitzen führen kann und damit mit einem hohen Schadenspotenzial einhergeht (TAKEMI et al. 2020). TAKEMI et al. (2019) fanden zum Beispiel bei dem Taifun Jebi in Japan im Jahr 2019 die maximale Windspitze in Osaka im Bodenniveau bei 60–70 m s⁻¹. TAKEMI et al. (2020) schlussfolgern, dass sowohl die Gebäudehöhenvariabilität als auch eine komplexe Gebäudeverteilung die Böigkeit von Winden auf Bodenniveau erhöht.

Während die Stadtstruktur das Windfeld verändert, gibt es auch Phänomene, die aus einem größeren Umfeld auf die Stadt wirken. Im Küstenbereich sind es Stürme, die Sturmfluten hervorrufen können und zusätzliches Schadenspotenzial liefern. Ende 2013 überquerten die Orkantiefs Christian und Xaver Europa (LEIDING et al. 2014). Es gab in Deutschland Stromausfälle, Schäden an der Infrastruktur und im Verkehrswesen. Während das schnell ziehende und relativ kleine Orkantief Christian nur wenig erhöhte Wasserstände an den Küsten brachte, gab es während des großräumigen und langsam ziehenden Tiefs Xaver im Bereich der Nordseeküste eine Sturmflut, die über mehrere Tiden anhielt (LEIDING et al. 2014). Ein Beispiel für eine positive Wirkung eines regionalen Windsystems auf das Stadtklima ist das Alpine Pumpen im Bereich von München, das nachfolgend ausführlicher vorgestellt wird.

4.1 Der Einfluss von Alpinem Pumpen auf die Durchlüftung von München

Für das Alpine Pumpen ist ein thermisches Windsystem verantwortlich (WINKLER et al. 2006, ZARDI und WHITEMAN 2013), das sich vor allem bei großräumig windschwachen Strahlungswetterlagen im Gebiet des Alpenvorlands und der Alpen bildet (siehe Abb. 4-5). Tagsüber erwärmt sich die Luft im Gebirge stärker als im Alpenvorland und in der Folge bildet sich ein Wärmeeff. Als Ausgleich strömt Luft aus dem Alpenvorland zum Gebirge (Talwind). Nachts dreht sich die Zirkulationsrichtung um. Die Luft im Gebirge kühlt schneller ab und es bildet sich ein Kältehoch. Der Luftdruck ist höher als auf gleicher Höhe im Alpenvorland und es folgt eine horizontale Ausgleichsströmung vom Gebirge ins Alpenvorland (Bergwind).

Alpines Pumpen tritt vor allem bei windschwachen Strahlungswetterlagen im Sommer auf, also an Tagen mit einer hohen Überwärmung des Stadtgebiets, daher ist dann eine abkühlende Wirkung zu erwarten. Je nach gewählten Kriterien zur Definition dieser Wetterlagen tritt es durchschnittlich an 20 bis 60 Tagen pro Jahr (1989–2008) in München auf.

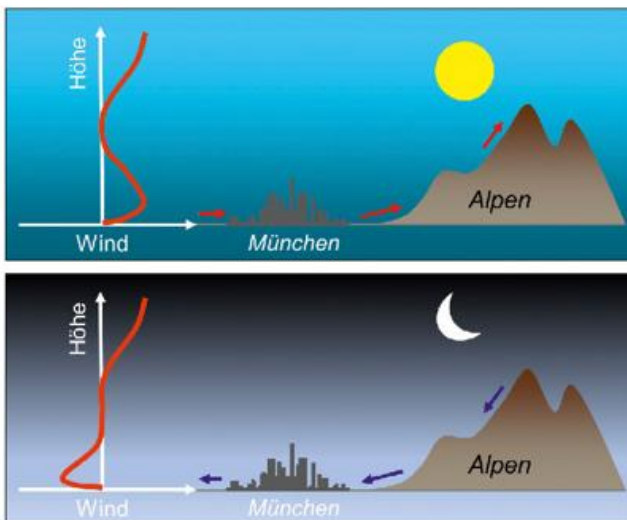


Abbildung 4-5: Skizzierte Darstellung des Alpinen Pumpens (aus MÜHLBACHER et al. 2020).

In einer idealisierten Fallstudie unter Verwendung des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell des Deutschen Wetterdienstes) wurden die Auswirkungen dieses Windsystems auf die Bildung der städtischen Wärmeinsel München untersucht (MÜHLBACHER et al. 2020). Dem Modell wurde dabei der oben beschriebene typische Tagesgang des Windes bei Alpinem Pumpen vorgegeben.

Die Studie zeigt, dass das Stadtgebiet nachts durch das Alpine Pumpen von Süden her durchlüftet wird und die maximale Wärmeinselintensität nicht mehr im Stadtzentrum, sondern in den nördlichen Stadtteilen zu finden ist

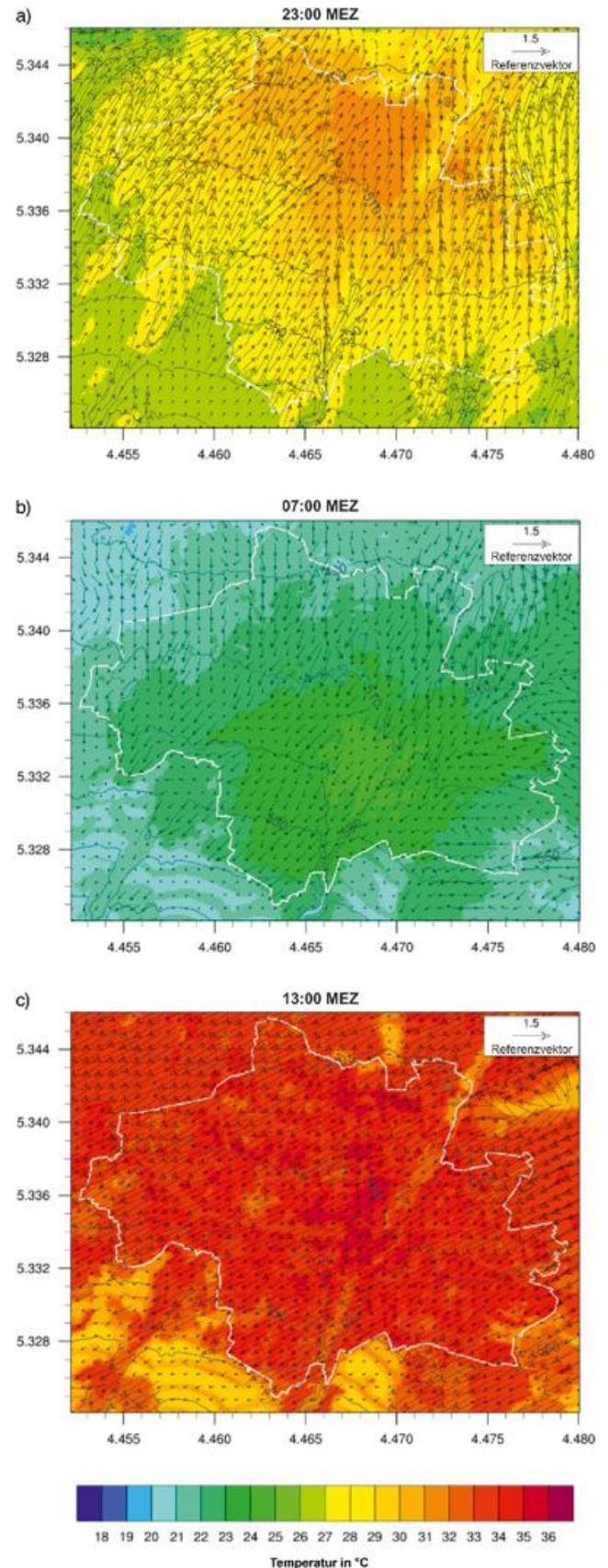


Abbildung 4-6: MUKLIMO_3-Ergebnisse der bodennahen Lufttemperaturen (Farbskala, °C) und Windvektoren (m s^{-1}) in 5 m über Grund für die Simulation mit Alpinem Pumpen für a) 23 MEZ, b) 7 MEZ, c) 13 MEZ. Schwarze Konturlinien zeigen die Geländehöhe in 20 m Intervallen. Die weiße Linie stellt die Stadtgrenze dar. Die Abbildungen sind entnommen aus MÜHLBACHER et al. (2020) mit Erlaubnis der Autoren.

(Abb. 4-6a, b). Vor allem die südlichen und südwestlichen Stadtteile Münchens profitieren somit während der Nacht und in den frühen Morgenstunden von der Kühlwirkung dieses thermischen Windsystems. Die höchsten Lufttemperaturen treten nachts aufgrund dieser südlichen Kaltluftströmungen in den nördlichen und nordöstlichen Stadtteilen bis hin zur dortigen Stadtgrenze auf. Die maximale Wärmeinsel liegt somit nicht im Stadtzentrum wie in den Simulationen ohne Berücksichtigung des regionalen Windsystems, sondern in den nördlich davon gelegenen Stadtteilen Schwabing, Milbertshofen und Kieferngarten.

Am Morgen ändert sich dagegen die Verteilung der Lufttemperatur im Stadtgebiet mit der Drehung des Windes auf nördliche bis nordöstliche Richtung (Abb. 4-6b). Nun strömt kühlere ländliche Luft in die nördlichen Stadtteile und die wärmere Luft verlagert sich in den Süden der Stadt.

Am Mittag und Nachmittag ist der Einfluss des Alpinen Pumpens auf die simulierte Lufttemperaturverteilung in München sehr gering (Abb. 4-6c). Aufgrund der starken Sonneneinstrahlung wird die Temperaturverteilung im Stadtgebiet von der Oberflächentemperatur und dem vertikalen turbulenten Wärmetransport dominiert. Auch die Wärmeinsel ist im Vergleich zur Nacht schwächer ausgeprägt.

Die Ergebnisse zeigen somit einen klaren Einfluss des Alpinen Pumpens auf die Lufttemperaturverteilung in München. Die Wirkung entfaltet sich hauptsächlich nachts, vormittags und im Sommer. Ein Vergleich der nächtlichen Temperaturunterschiede zwischen der DWD Station München-Stadt und zwei Umlandstationen für die Jahre 2013–2015 bestätigt diese Ergebnisse: bei günstigen Bedingungen für Alpines Pumpen (das heißt windschwachen Strahlungswetterlagen) ist der Wärmeinseleffekt an dieser im nördlichen Stadtgebiet gelegenen Station deutlich höher als bei allen anderen Wetterlagen.

5 Ausblick

Ein umfangreiches Verständnis des urbanen Windfeldes ist die Basis für stadtplanerische Maßnahmen. Das städtische Windfeld ist jedoch sehr komplex. Durch immer weitere Verbesserungen bei der Modellierung des Klimas in der Stadt, insbesondere durch höher aufgelöste und komplexere Stadtklimamodelle, sind zukünftig weitere Fortschritte beim Verständnis der Windstruktur zu erwarten. Mit dem Stadtklimamodell PALM-4U ist es möglich, die atmosphärischen Prozesse gebäudeauflösend zu modellieren (MARONGA et al. 2020). Dazu gehören human-bio-meteorologische Größen, aber auch der Transport von Luftschadstoffen.

Zur Evaluierung der Modellergebnisse sind zudem Windmessungen innerhalb des Stadtgebiets sehr wichtig. Der Deutsche Wetterdienst baut aktuell ein Netz von ca. zehn Stadtklimastationen in unterschiedlichen Städten auf, die

einen direkten Vergleich mit den Messungen im Umland ermöglichen und zur Modellevaluation herangezogen werden können (DWD 2023a).

Literatur

- BADAS, M.G., GARAU, M., QUERZOLI, G., 2021: How gable roofs change the mechanisms of turbulent vertical momentum transfer: A LES study on two-dimensional urban canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **209**, 104432.
- BAUMÜLLER, J., KATZSCHNER, L., 2023: Stadtklima und Klimaanpassung in der städtebaulichen Planung. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 115-123.
- BISSOLLI, P., GRIESER, J., DOTZEK, N., WELSCH, M., 2007: Tornadoes in Germany 1950–2003 and their relation to particular weather conditions. *Global and Planetary Change* **57**, 124-138.
- BUCCOLIERI, R., SALIM, S.M., LEO, L.S., DI SABATINO, S., CHAN, A., IELPO, P., DE GENNARO, G., GROMKE, C., 2011: Analysis of local scale tree-atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction. *Atmospheric Environment* **45**, 1702-1713.
- CARPENTIERI, M., HAYDEN, P., ROBINS, A.G., 2012: Wind tunnel measurements of pollutant turbulent fluxes in urban intersections. *Atmospheric Environment* **46**, 669-674.
- CARPENTIERI, M., ROBINS, A.G., 2015: Influence of urban morphology on air flow over building arrays. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **145**, 61-74.
- DA SILVA, F.T., REIS JR, N.C., SANTOS, J.M., GOU-LART, E.V., DE ALVAREZ, C.E., 2021: The impact of urban block typology on pollutant dispersion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **210**, 104524.
- DI SABATINO, S., KASTNER-KLEIN, P., BERKOWICZ, R., BRITTER, R., FEDOROVICH, E., 2003: The modelling of turbulence from traffic in urban dispersion models – Part I: theoretical considerations. *Environmental Fluid Mechanics* **3**, 129-143.
- DROSTE, A.M., STEENEVELD, G.-J., HOLTSLAG, A.A., 2018: Introducing the urban wind island effect. *Environmental Research Letters* **13**, 094007.
- DWD, 2023a: Stadtklima – die städtische Wärmeinsel. Abruf am 11.04.2023, URL: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html.
- DWD, 2023b: Untersuchung zum Stadtklima in Hannover. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, in Vorbereitung.
- FOKEN, T., PARLOW, E., GROSS, G., LEITL, B., 2023: Untersuchungsmethoden zum Stadtklima. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 97-114.
- GHASEMI, Z., ESFAHANI, M.A., BISADI, M., 2015: Promotion of urban environment by consideration of human thermal & wind comfort: a literature review. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* **201**, 397-408.

- GROMKE, C., 2009: Einfluss von Bäumen auf die Durchlüftung von innerstädtischen Straßenschluchten. *KIT Scientific Publishing* **2002**.
- GROSS, G., 2014: On the estimation of wind comfort in a building environment by micro-scale simulation. *Meteorologische Zeitschrift* **23**, 51-62.
- GROSS, G., 2019: On the self-ventilation of an urban heat island. *Meteorologische Zeitschrift* **28**.
- GU, Z.-L., ZHANG, Y.-W., CHENG, Y., LEE, S.-C., 2011: Effect of uneven building layout on air flow and pollutant dispersion in non-uniform street canyons. *Building and Environment* **46**, 2657-2665.
- HAGISHIMA, A., TANIMOTO, J., NAGAYAMA, K., MENO, S., 2009: Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries. *Boundary-Layer Meteorology* **132**, 315-337.
- HENNINGER, S., WEBER, S., 2019: Stadtklima. *utb*, 260 S.
- HUPFER, P., KUTTLER, W., 2006: Witterung und Klima; Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12. Aufl. *Teubner*, Stuttgart.
- JARRAUD, M., 2008: Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8). World Meteorological Organisation (Hrsg.), Genf.
- JOHANSSON, E., YAHIA, M.W., 2020: Wind comfort and solar access in a coastal development in Malmö, Sweden. *Urban Climate* **33**, 100645.
- KASTNER-KLEIN, P., BERKOWICZ, R., BRITTER, R., 2004: The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons. *Meteorology and Atmospheric Physics* **87**, 121-131.
- KASTNER-KLEIN, P., BERKOWICZ, R., PLATE, E., 2000: Modelling of vehicle-induced turbulence in air pollution studies for streets. *International Journal of Environment and Pollution* **14**, 496-507.
- KASTNER-KLEIN, P., FEDOROVICH, E., KETZEL, M., BERKOWICZ, R., BRITTER, R., 2003: The modelling of turbulence from traffic in urban dispersion models – Part II: evaluation against laboratory and full-scale concentration measurements in street canyons. *Environmental Fluid Mechanics* **3**, 145-172.
- KLUKOVÁ, Z., NOSEK, Š., FUKA, V., JAŇOUR, Z., CHALOUPECKÁ, H., ĐOUBALOVÁ, J., 2021: The combining effect of the roof shape, roof-height non-uniformity and source position on the pollutant transport between a street canyon and 3D urban array. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **208**, 104468.
- KÖPKE, P., SCHÖNWIESE, C.-D., HEIMANN, M., KUTTLER, W., 2000: Auswirkungen atmosphärischer Spurenstoffe auf Strahlung und Klima. Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie, *Springer*, 297-470.
- KURPPA, M., HELLSTEN, A., AUVINEN, M., RAASCH, S., VESALA, T., JÄRVI, L., 2018: Ventilation and air Quality in city blocks using large-eddy simulation – urban planning perspective. *Atmosphere* **9**, 65.
- KUTTLER, W., 2004: Stadtklima. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* **16**, 187-199.
- KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.
- KUTTLER, W., MIETHKE, A., DÜTEMMEYER, D., BARLAG, A.-B., 2015: Das Klima von Essen / The climate of Essen. *Westarp Wissenschaften*, Hohenwarsleben, 249 S.
- LEIDING, T., TINZ, B., ROSENHAGEN, G., LEFEBVRE, C., HAESELER, S., HAGEMANN, S., BASTIGKEIT, I., STEIN, D., SCHWENK, P., MÜLLER, S., 2014: Meteorological and oceanographic conditions at the FINO platforms during the severe storms Christian and Xaver. *DEWI Magazin* **44**, 16-25.
- LLAGUNO-MUNITXA, M., BOU-ZEID, E., 2018: Shaping buildings to promote street ventilation: A large-eddy simulation study. *Urban climate* **26**, 76-94.
- MAGNUSSON, S., DALLMAN, A., ENTEKHABI, D., BRITTER, R., FERNANDO, H.J., NORFORD, L., 2014: On thermally forced flows in urban street canyons. *Environmental Fluid Mechanics* **14**, 1427-1441.
- MARONGA, B., BANZHAF, S., BURMEISTER, C., ESCH, T., FORKEL, R., FRÖHLICH, D., FUKA, V., GEHRKE, K.F., GELETIĆ, J., GIERSCH, S., 2020: Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development* **13**, 1335-1372.
- MATZARAKIS, A., 2023: Hitze in Städten – Quantifizierung, Warnsysteme und Hitzeaktionspläne zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 61-70.
- MAYER, H., BECKRÖGE, W., MATZARAKIS, A., 1994: Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. *UVP-report* **5**, 265-267.
- MITTAL, H., SHARMA, A., GAIROLA, A., 2018: A review on the study of urban wind at the pedestrian level around buildings. *Journal of Building Engineering* **18**, 154-163.
- MÜHLBACHER, G., KOßMANN, M., SEDLMEIER, K., WINDERLICH, K., 2020: Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **252**.
- NOSEK, Š., KLUKOVÁ, Z., JAKUBCOVÁ, M., JAŇOUR, Z., 2022: The effect of courtyard buildings on the ventilation of street canyons: A wind-tunnel study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **220**, 104885.
- NOSEK, Š., KUKAČKA, L., KELLNEROVÁ, R., JURČÁKOVÁ, K., JAŇOUR, Z., 2016: Ventilation processes in a three-dimensional street canyon. *Boundary-layer meteorology* **159**, 259-284.
- NOSEK, Š., KUKAČKA, L., JURČÁKOVÁ, K., KELLNEROVÁ, R., JAŇOUR, Z., 2017: Impact of roof height non-uniformity on pollutant transport between a street canyon and intersections. *Environmental Pollution* **227**, 125-138.
- OKE, T.R., 1997: Urban environments. *The surface climates of Canada*, 303-327.

OKE, T.R., MILLS, G., CHRISTEN, A., VOOGT, J.A., 2017: Urban climates. *Cambridge University Press*.

PARK, S.-B., BAIK, J.-J., 2013: A large-eddy simulation study of thermal effects on turbulence coherent structures in and above a building array. *Journal of applied meteorology and climatology* **52**, 1348-1365.

PARK, S.-B., BAIK, J.-J., RAASCH, S., LETZEL, M.O., 2012: A large-eddy simulation study of thermal effects on turbulent flow and dispersion in and above a street canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **51**, 829-841.

PAULEIT, S., ERLWEIN, S., LINKE, S., RAHMAN, M., ZÖLCH, T., RÖTZNER, T., 2023: Grün-blaue Infrastruktur für die Klimawandelanpassung der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 79-88.

PENG, Y., BUCCOLIERI, R., GAO, Z., DING, W., 2020: Indices employed for the assessment of “urban outdoor ventilation” – A review. *Atmospheric Environment* **223**, 117211.

PENG, L., LIU, J.-P., WANG, Y., CHAN, P.-W., LEE, T.-C., PENG, F., WONG, M.-S., LI, Y., 2018: Wind weakening in a dense high-rise city due to over nearly five decades of urbanization. *Building and Environment* **138**, 207-220.

POL, S.U., BROWN, M.J., 2008: Flow patterns at the ends of a street canyon: Measurements from the Joint Urban 2003 field experiment. *Journal of applied meteorology and climatology* **47**, 1413-1426.

RAFAILIDIS, S., 1997: Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. *Boundary-layer meteorology* **85**, 255-271.

REN, C., YANG, R., CHENG, C., XING, P., FANG, X., ZHANG, S., WANG, H., SHI, Y., ZHANG, X., KWOK, Y.T., NG, E., 2018: Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan—the implementation in Chinese cities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **182**, 170-188.

ROTH, M., 2000: Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **126**, 941-990.

SCHÖNWIESE, C.-D., 2020: Klimatologie. *utb GmbH*.

SIEVERS, U., 2005: Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **227**.

SORIANO, C., BATCHVAROVA, E., BERKOWICZ, R., BRECHLER, J., JANOUR, Z., KASTNER-KLEIN, P., MIDDLETON, D., PRIOR, V., ROTACH, M., SACRÉ, C., 2001: Comparison of urban and rural wind speeds. Extended abstracts of the Workshop on Urban Boundary Layer Parameterisations, 41-50.

TAKEMI, T., YOSHIDA, T., HORIGUCHI, M., VANDERBAUWHEDE, W., 2020: Large-eddy-simulation analysis of airflows and strong wind hazards in urban areas. *Urban Climate* **32**, 100625.

TAKEMI, T., YOSHIDA, T., YAMASAKI, S., HASE, K., 2019: Quantitative estimation of strong winds in an urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large-eddy simulations. *SOLA*.

VARDOULAKIS, S., FISHER, B.E., PERICLEOUS, K., GONZALEZ-FLESCA, N., 2003: Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric environment* **37**, 155-182.

VDI, 2020: VDI 3787 Blatt 4. Umweltmeteorologie – Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung. *Beuth Verlag*, Berlin, 39 S.

WINKLER, P., LUGAUER, M., REITEBUCH, O., 2006: Alpines Pumpen. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **32**, 34-42.

WURZLER, S., HEBBINGHAUS, H., ROGALLA, L., BECK, N., KLOSTERKÖTHER, A., GEIGER, J., 2023: Entwicklung der Luftqualität in der Metropolregion Rhein-Ruhr. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 51-60.

YANG, F., GAO, Y., ZHONG, K., KANG, Y., 2016: Impacts of cross-ventilation on the air quality in street canyons with different building arrangements. *Building and Environment* **104**, 1-12.

YAZID, A.W.M., SIDIK, N.A.C., SALIM, S.M., SAQR, K.M., 2014: A review on the flow structure and pollutant dispersion in urban street canyons for urban planning strategies. *Simulation* **90**, 892-916.

ZARDI, D., WHITEMAN, C.D., 2013: Diurnal mountain wind systems. *Mountain weather research and forecasting*, 35-119.

ZHANG, G., AZORIN-MOLINA, C., WANG, X., CHEN, D., MCVICAR, T.R., GUIJARRO, J.A., CHAPPELL, A., DENG, K., MINOLA, L., KONG, F., WANG, S., SHI, P., 2022: Rapid urbanization induced daily maximum wind speed decline in metropolitan areas: A case study in the Yangtze River Delta (China). *Urban Climate* **43**, 101147.

Kontakt

DR. KATRIN SEDLMEIER
 Deutscher Wetterdienst
 Regionales Klimabüro München
 Helene-Weber-Allee 21
 80637 München
 katrin.sedlmeier@dwd.de

DR. BIRGER TINZ
 Deutscher Wetterdienst
 Regionales Klimabüro Hamburg
 Bernhard-Nocht Straße 76
 20359 Hamburg
 birger.tinz@dwd.de

S. WURZLER, H. HEBBINGHAUS, L. ROGALLA, N. BECK, A. KLOSTERKÖTHER,
J. GEIGER

5

Entwicklung der Luftqualität in der Metropolregion Rhein-Ruhr

Air quality development in the Rhine-Ruhr metropolitan region

Zusammenfassung

Die Luftqualität ist ein wichtiger Bestandteil des Stadtklimas. In der Metropolregion Rhein-Ruhr wurde in den letzten 60 Jahren die Luftqualität deutlich verbessert. In den 1960er bis 1980er Jahren standen Schwebstaub und Schwefeldioxid aus Industrie und Hausbrand im Fokus. Durch die europäische Luftqualitätsgesetzgebung ist die Luftqualität in den Städten und damit der Stadtklimabezug stärker in den Fokus gerückt. Nun stehen Feinstaub, Ozon und Stickoxide in den Innenstädten im Zentrum der Betrachtungen. In den letzten Jahren wurde eine deutliche Reduktion der Luftschadstoffbelastung aus dem Straßenverkehr erreicht. Die wachsenden Bemühungen der Städte zur Anpassung an den Klimawandel werden auch bei Luftqualitätsbetrachtungen immer wichtiger. Idealerweise werden Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität und zur Verbesserung des Stadtklimas gemeinsam geplant und unterstützen sich gegenseitig.

Summary

Air quality is an important component of the urban climate. In the Rhine-Ruhr metropolitan region, air quality has been significantly improved over the past 60 years. In the 1960s to the 1980s, the focus was on suspended particulate matter and sulfur dioxide from industry and domestic heating. Due to European air quality legislation attention has been focused more closely on urban air quality, and thus urban climate. Now, particulate matter, ozone and nitrogen oxides in urban centres are the focus of attention. In recent years, a significant reduction of air pollutant emissions from road traffic has been achieved. The growing efforts of cities to adapt to climate change are also becoming increasingly important in air quality considerations. Ideally, measures to improve air quality and to improve the urban climate are planned together and complement each other.

1 Einleitung

Das Stadtklima wird durch meteorologische Parameter charakterisiert. Aber auch die Analyse der Luftqualität ist ein wesentlicher Aspekt, der in der Stadtklimaforschung eine wichtige Rolle spielt. Die Industrialisierung, die Mobilität und die Bevölkerungsdichte haben ebenso Einfluss auf das Stadtklima wie gesetzliche Vorgaben etwa zur Luftqualität und Luftreinhaltung. Im Idealfall gehen Maßnahmen zu Luftreinhaltung, städtischem Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel Hand in Hand.

Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl an Quellen für Luftbeimengungen. Gerade in Städten findet sich eine erhöhte Anzahl an Emissionsquellen, wie Kfz-Verkehr, Hausbrand und Industrie, die auf die Luftqualität Einfluss nehmen. Die Immissionsituation wird darüber hinaus durch schlechtere Austauschbedingungen der bodennahen Luft unterhalb der Hindernisschicht aufgrund der dichteren Bebauung be-

stimmt. Dies gilt insbesondere für die Situation in Straßenschluchten. Aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte in Städten ist die Anzahl betroffener Menschen groß. Darum wird in diesem Beitrag mit Fokus auf das Gebiet Rhein-Ruhr in Nordrhein-Westfalen (NRW) betrachtet, wie sich die Luftqualität in den Städten entwickelt hat, welche Probleme auftraten, welche Maßnahmen ergriffen wurden und wie sich diese ausgewirkt haben. Die dicht bevölkerte und hoch industrialisierte Metropolregion Rhein-Ruhr war für schlechte Luftqualität in Deutschland bis in die 1960/70er Jahre bekannt (KUTTLER et al. 2023). Sie war Ausgangspunkt der Luftqualitätsgesetzgebung in NRW. Die regelmäßige Untersuchung der Luftqualität begann dort bereits in den 1960er Jahren. Seit dieser Zeit hat sich die Luftqualität im Bereich des Rhein-Ruhr-Raumes deutlich verbessert. Der Fokus der Luftqualitätsgesetzgebung, die im Einklang mit der europäischen Luftqualitätsgesetzgebung steht, ist nicht nur auf die Industrieemissionen, sondern auch vermehrt auf die des Straßenverkehrs in den Städten gerichtet

worden. Im Folgenden wird auch auf die aktuelle Luftqualitätsgesetzgebung sowie auf potenzielle Wechselwirkungen zwischen städtischen Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen sowie die Luftqualität eingegangen.

2 Die Metropolregion Rhein-Ruhr und die Luftqualität früherer Jahre bis heute

Die Metropolregion Rhein-Ruhr umfasst Städte und Kreise im Ruhrgebiet und entlang der Rheinschiene zwischen Duisburg und Bonn. Das Ruhrgebiet besitzt eine hohe Bevölkerungsdichte und ist nach wie vor von metallverarbeitenden Großbetrieben und Schwerindustrie geprägt. Autobahnen und Wasserstraßen, wie der Rhein und das westdeutsche Kanalnetz, zählen zu den wichtigsten Verkehrsachsen in diesem Raum. Der größte Binnenhafen Europas liegt in der Ruhrgebietsstadt Duisburg. Entlang des betrachteten Rheinabschnitts befinden sich ebenfalls große Städte und vor allem chemische Industriebetriebe.

In den 1960er Jahren war das Ruhrgebiet Zentrum der deutschen Schwerindustrie mit 82 Hochöfen und 93 Kohlekraftwerken. Damit verbunden waren Staubemissionen von bis zu 300.000 Tonnen pro Jahr und tägliche Staubbiederschläge von bis zu 4 Gramm pro Quadratmeter. Im Oktober 1963 wurde in der Metropolregion Rhein-Ruhr mit kontinuierlichen amtlichen Messungen von Luftschadstoffen begonnen. Gemessen wurden in den Anfangszeiten Schwebstaub und Schwefeldioxid (SO_2). Das ursprüngliche Ziel dieses Messprogramms war der Gesundheitsschutz; gegenwärtig können diese langjährigen Messungen auch für die Entwicklung der Luftqualität herangezogen werden. Schwebstaub umfasst alle in der Luft enthaltenen (schwebenden) Partikel jeglicher Größe. Während der stärksten Smog-Episode im Dezember 1962 wurden SO_2 -Werte von bis zu $5000 \mu\text{g m}^{-3}$ als Tagesmittelwert und Schwebstaub-

werte von bis zu $2400 \mu\text{g m}^{-3}$ erreicht (BRUCKMANN et al. 2014a, KUTTLER et al. 2023). Zum Vergleich: Im Jahr 2021 lagen die maximalen Tagesmittelwerte für die SO_2 - bzw. PM_{10} -Konzentration bei $110 \mu\text{g m}^{-3}$ bzw. $166 \mu\text{g m}^{-3}$. Die hohen Konzentrationen in den 1960er Jahren führten zu einem Anstieg der Erkrankungen und zu zusätzlichen Todesfällen (STEIGER und BROCKHAUS 1966). Diese Situation war Auslöser und Antrieb für die Luftqualitätsgesetzgebung in NRW (BRUCKMANN et al. 2014a).

In Abbildung 5-1 ist der Langzeittrend der SO_2 -Konzentration in der Metropolregion Rhein-Ruhr anhand der Jahresmittelwerte von 1964 bis 2021 dargestellt. Es handelt sich um den Mittelwert der Jahreskenngrößen ausgewählter industrienaher Stationen und Hintergrundstationen im Rhein-Ruhr-Gebiet. SO_2 entsteht unter anderem bei der Verbrennung von fossilen, schwefelhaltigen Brennstoffen wie Kohle oder Öl.

Seit Ende der 1990er Jahre sind die SO_2 -Werte an den nordrhein-westfälischen Messstationen auf einem derart niedrigen Niveau (Jahresmittelwerte unter $10 \mu\text{g m}^{-3}$), dass alle aktuell gültigen Grenzwerte für SO_2 (siehe Tabelle 5-1) eingehalten werden. Damit ist der früher relevanteste Schadstoff in Deutschland für die Luftqualität heute bedeutungslos geworden und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Emissionsmindernde Maßnahmen wie die Rauchgasentschwefelung und die Umstellung des Hausbrands von Kohle auf Öl oder Gas haben, auch aufgrund sukzessive verschärfter Gesetzgebungen, im Laufe der Jahrzehnte zu einer deutlichen Abnahme der Immissionskonzentrationen geführt (BRUCKMANN et al. 2014b). Vor allem die Emissionen aus dem Industriesektor haben deutlich abgenommen. Wurden 1983 noch 1,2 Megatonnen (Mt) SO_2 und 0,7 Mt NO_x emittiert, so waren es im Jahr 1990 nur noch 0,2 Mt SO_2 und 0,22 Mt NO_x . Auch die PM_{10} - und VOC-

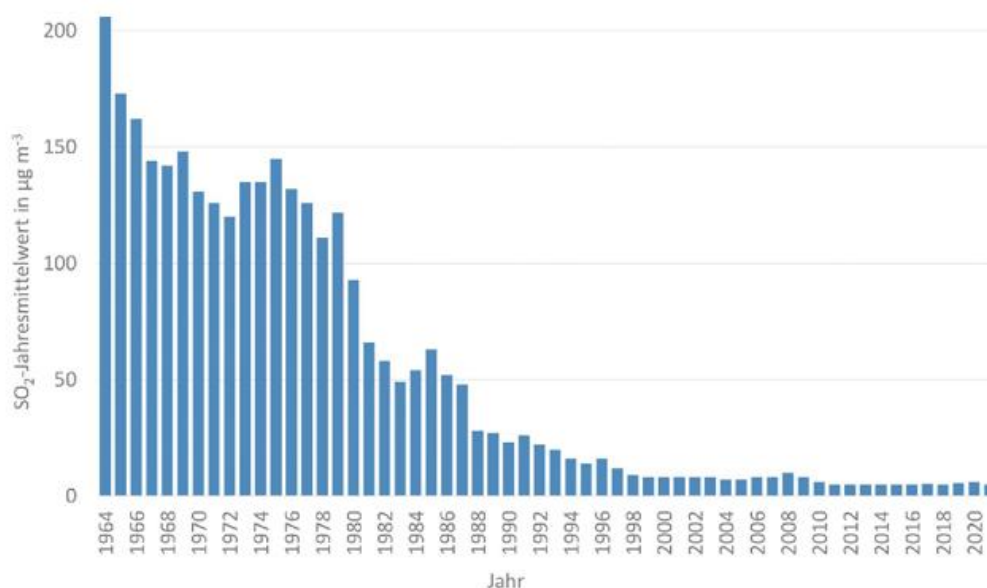


Abbildung 5-1: Trend der Jahresmittelwerte der SO_2 -Konzentration (1964 bis 2021) ausgewählter industrienaher Stationen und Hintergrundstationen in der Metropolregion Rhein-Ruhr.

Emissionen des Industriebereichs sanken von 1977 bis 1997 bzw. für VOC bis 2000 um ca. 90 % (BRUCKMANN et al. 2014b). Zeitgleich nahm die Bevölkerung von 17,0 Mio. (1970) auf 17,9 Mio. (2021) zu. Die PM₁₀-Emissionen aus dem Hausbrand reduzierten sich durch die Umstellung von Kohle auf Öl und Gas in diesem Zeitraum stark. Der Fahrzeugbestand in NRW stieg von 8,4 Millionen (1987) zugelassenen Kfz auf 12,4 Millionen (2021) (INFORMATION UND TECHNIK NRW 2023). Die Emissionen aus dem Straßenverkehr blieben über viele Jahre ähnlich hoch und zeigen erst in den letzten Jahren einen Rückgang.

3 Aktuelle Luftqualität, Gesetzgebung und das Luftqualitätsmessnetz in NRW

Seit über 20 Jahren gelten in Europa einheitliche, rechtlich verbindliche Luftqualitätsrichtlinien und Grenzwerte für Luftschadstoffe. Darin werden auch Anforderungen an die Messung (z. B. Messverfahren, Datenqualitätsziele, Mindestzahl der Probenahmestellen), immissionsseitige Grenzwerte, Vorgehen bei Grenzwertüberschreitung sowie emissionsseitige Vorgaben getroffen. In der derzeit gültigen 39. Bundesimmissionschutzverordnung ist ein Luftschadstoff definiert als ein in der Luft vorkommender Stoff, der „schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt insgesamt haben kann“. Die aktuellen Immissionsgrenzwerte für die hier dargestellten Stoffe Stickstoffdioxid (NO₂), Feinstaub (PM₁₀), Schwefeldioxid (SO₂) und Ozon (O₃) gemäß Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG (im Folgenden: LQRL) sind in Tabelle 5-1 angegeben. Für die Erfüllung der Messanforderungen nach der aktuellen LQRL wird in NRW ein Basismessnetz betrieben. Das Basismessnetz dient dazu, die großräumige Immissionsbelastung und die langfristige Entwicklung dieser zu beobachten. Die Standorte im Basismessnetz werden über einen längeren Zeitraum möglichst unverändert beibehalten. Ergänzt wird das Basismessnetz durch das flexible Sondermessnetz für zusätzliche Belastungsschwerpunkte mit Verkehrs- oder Industrieinfluss. Die Messungen des Sondermessnetzes erfolgen in der Regel für mindestens ein Kalenderjahr.

Aktuell werden in NRW durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV NRW) vor allem NO₂ (2021: 135 Probenahmestellen), Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2,5}, 2021: 66 Probenahmestellen) und O₃ (2021: 27 Probenahmestellen) gemessen. SO₂ wird an sechs Probenahmestellen erfasst. Sonstige klimarelevante Treibhausgase, wie CO₂ oder Methan, sind kein Bestandteil der aktuellen LQRL. Denn CO₂ und Methan haben in den bodennah vorhandenen Konzentrationen keine gesundheitliche Wirkung auf den Menschen, sind somit keine Luftschadstoffe im klassischen Sinne und werden vom LANUV NRW nicht gemessen. Das Messnetz beinhaltet neben verkehrs- und industrienahen Messungen auch Standorte im regionalen und städtischen Hintergrund, wie es in der LQRL gefordert wird. Der Begriff „städtischer Hintergrund“ bezeichnet Gebiete, in denen die für eine Stadt typische Luftqualität abseits von Belastungsschwerpunkten vorherrscht. Der Begriff „regionaler Hintergrund“ bezeichnet Gebiete, in denen die Luftschadstoffkonzentration nicht von Emissionen im Umfeld beeinflusst wird und somit die großräumige Luftqualität ermittelt werden kann.

Im Jahr 2021 wurde der Grenzwert für den Jahresmittelwert der NO₂-Konzentration nur an einer neu eingerichteten Probenahmestelle in Nordrhein-Westfalen überschritten. Auch für alle weiteren Luftschadstoffe, für die Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit vorliegen, ist die Entwicklung positiv, denn die genannten Grenzwerte wurden an allen Probenahmestellen in Nordrhein-Westfalen unterschritten. Dennoch sind die derzeit auftretenden Konzentrationen an NO₂, PM₁₀ und O₃ weiterhin relevant für Wirkungsbetrachtungen.

4 Aktuelle Entwicklung der Luftqualität

Bei Grenzwertüberschreitungen fordert die LQRL eine Verursachermanalyse der Quellen, die zu der Luftschadstoffbelastung beitragen. Auf dieser Grundlage werden Maßnahmen zur Minderung an den hauptsächlich relevanten Quellen umgesetzt.

Tabelle 5-1: Aktuell nach der Luftqualitätsrichtlinie (LQRL) 2008/50/EG gültige Immissionsgrenzwerte für NO₂, PM₁₀ und SO₂ sowie Ziel-, Informations- und Alarmschwellen für O₃.

Schadstoff	Mittelungszeitraum	Wert	Zulässige Überschreitungen	Art des Werts
Stickstoffdioxid (NO ₂) in µg m ⁻³	1 Stunde	200	18 Stunden / Jahr	Grenzwert
	1 Jahr	40	-	Grenzwert
Feinstaub PM10 in µg m ⁻³	24 Stunden	50	35 Tage / Jahr	Grenzwert
	1 Jahr	40	-	Grenzwert
Schwefeldioxid (SO ₂) in µg m ⁻³	1 Stunde	350	24 Stunden / Jahr	Grenzwert
	24 Stunden	125	3 Tage / Jahr	Grenzwert
Ozon (O ₃) in µg m ⁻³	8 Stunden	120	25 Tage / Jahr	Zielwert
	1 Stunden	180	-	Informationsschwelle
	1 Stunden	240	-	Alarmschwelle

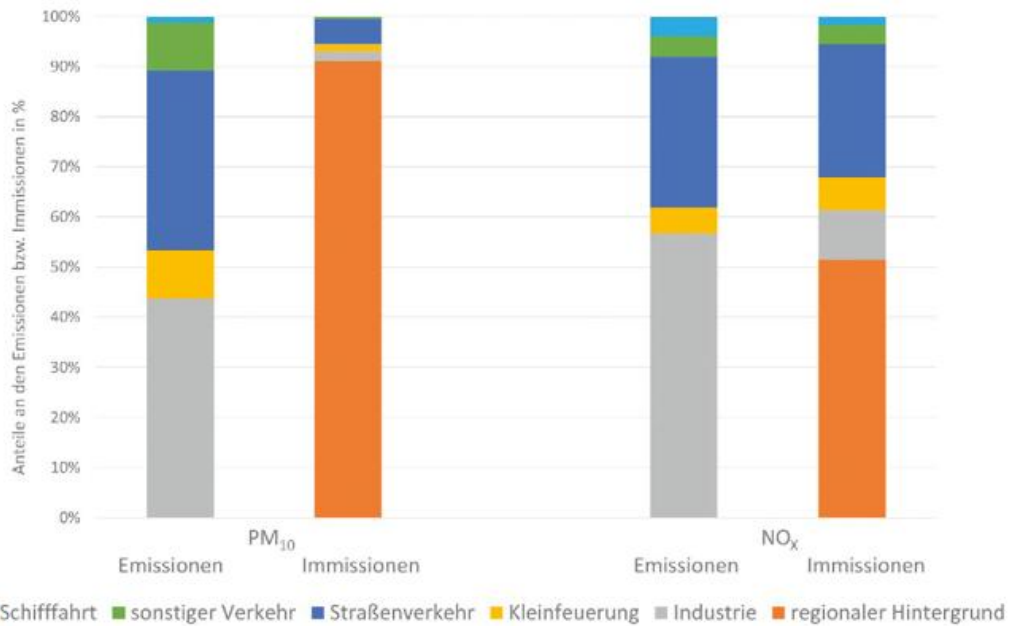


Abbildung 5-2: Emissionsanteile NO_x und PM₁₀ für NRW sowie mittlere NO_x- und PM₁₀-Immissionsbelastung in der Ruhrgebietsstadt Essen (Bezugsjahr 2020).

NO₂ entsteht in erster Linie direkt aus Verbrennungsprozessen sowie durch chemische Umwandlung von NO, das ebenfalls hauptsächlich aus Verbrennungsprozessen hervorgeht. Bei Emissionsangaben wird in der Regel die Summe von NO₂ und NO, umgerechnet auf die Molmasse von NO₂, angegeben („NO_x als NO₂“ nachfolgend abgekürzt als „NO_x“). Die Hauptquellen für NO_x sind Industrie, Hausbrand und Kfz-Verkehr. Weitere Quellen für NO_x sind im Vergleich hierzu vernachlässigbar.

Feinstaub hat eine Vielzahl von Quellen: Man unterscheidet primären Feinstaub – der aus natürlichen Quellen wie

Krustenmaterial der Erdoberfläche und aus anthropogenen Quellen wie Industrie und Verkehr stammt – vom sekundären Feinstaub, der durch die Gasphase entsteht.

Bei der Ermittlung der Hauptverursacher der Luftschadstoffbelastung ist zu beachten, dass die Einzelquellen und Verursacherguppen mit dem höchsten Schadstoffausstoß (Emission) nicht unbedingt den größten Anteil an der immissionsseitigen Luftschadstoffbelastung in der Luftschicht in Bodennähe (1,5 bis 4 Meter Höhe) haben. Dies ist in Abbildung 5-2 am Beispiel der Ruhrgebietsstadt Essen für NO_x und PM₁₀ dargestellt. Gründe hierfür sind die tur-

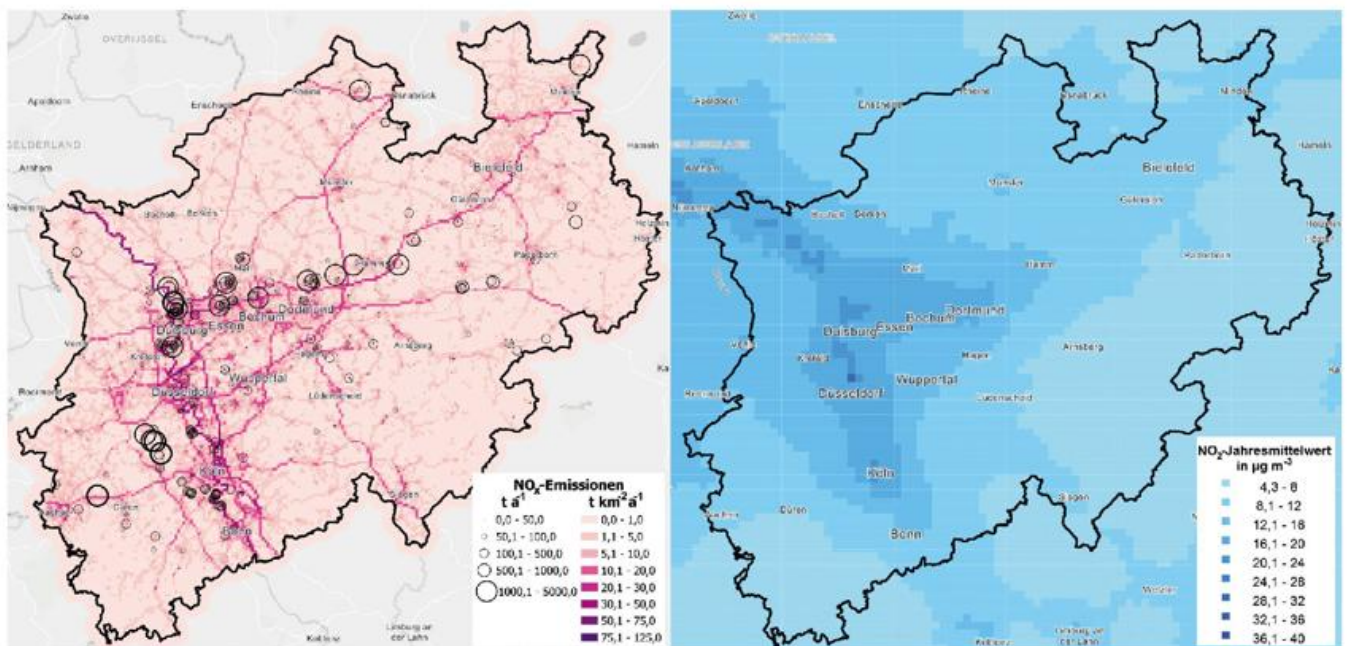


Abbildung 5-3: Links: NO_x-Emissionen aus NRW. Rechts: NO₂-Immission in NRW. Ergebnisse des Ausbreitungsmodells EURAD-IM (2018) für das Bezugsjahr 2019.

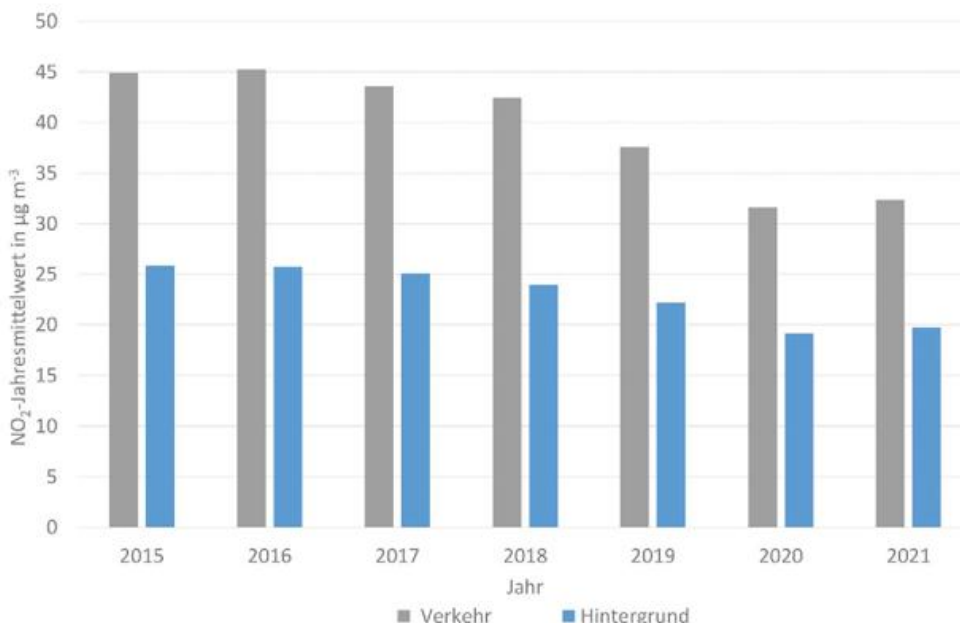


Abbildung 5-4: Trend der NO₂-Jahresmittel in µg m⁻³ gemittelt über die Verkehrs- bzw. städtischen Hintergrundstationen der Metropolregion Rhein-Ruhr.

bulente Durchmischung, atmosphärischer Transport und die Emissionshöhe (z. B. Kaminhöhe).

Wie beispielhaft in Abbildung 5-3 für NO₂ dargestellt, sind die Emission und die großräumige Luftschadstoffkonzentration – je nach Quellregion – regional unterschiedlich. Deutlich ist das Rhein-Ruhr-Gebiet an den höheren Werten zu erkennen.

4.1 Stickstoffdioxid NO₂

Insbesondere der Straßenverkehr kann zu erhöhten NO₂-Konzentrationen in den Innenstädten führen. In Kombination mit ungünstigen Ausbreitungsbedingungen weisen dadurch vor allem viel befahrene Straßenschluchten häufig hohe NO₂-Werte auf. Daher liegt bei den NO₂-Messungen ein Fokus auf verkehrsnahen Stationen in den Innenstädten.

Die verkehrsnahen Messungen zeigen eine Abnahme der NO_x- und NO-Konzentrationen in den vergangenen 30 Jahren. Bei NO₂ ist diese Entwicklung, trotz einer Vielzahl emissionsmindernder Maßnahmen und Verschärfungen in den Emissionsbegrenzungen beim Verkehr (z. B. Einführung der Euro-Normen), deutlich weniger stark ausgeprägt. Für den Zeitraum von 1990 bis 2010 zeigt sich sogar eine Stagnation der NO₂-Werte. Hierfür gibt es neben dem steigenden Verkehrsaufkommen weitere Gründe:

- Chemische Umwandlung: NO₂ wird aus NO gebildet, bis Sättigung erreicht ist. Solange bei Sättigung noch ein Reservoir an NO vorhanden ist, führt eine Minderung bei NO nicht oder nur in geringem Maße zu einer Abnahme von NO₂.
- NO₂-Direktemissionen: Die Emissionsrichtlinien regeln die erlaubten Emissionsmengen an NO_x. Wenn

insgesamt weniger NO_x emittiert wird, aber der Anteil NO₂ in der Emission zunimmt, führt dies zu weniger NO_x, aber nicht unbedingt zu weniger NO₂.

- Reale Emissionen versus Prüfstandemissionen: Auch bei Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der Euronormen auf dem Prüfstand waren die Emissionen im realen Betrieb oft deutlich größer (FRANCO et al. 2014), sodass die angestrebten Emissionsminderungen in der Realität nicht in dem Maße Wirkung zeigten.
- Gestiegener Anteil der Dieselfahrzeuge: In den 90er Jahren bis zum Jahr 2000 betrug der Anteil der Dieselfahrzeuge ungefähr 20 % der Flotte. Mittlerweile sind es 30 % (KBA 2022). Die NO_x-Emissionen von Dieselfahrzeugen sind deutlich höher als die von Benzinern.

Ab dem Jahr 2017 ist ein deutlich sinkender Trend auch bei den NO₂-Konzentrationen zu erkennen. Hier griffen die verschärften Emissionsanforderungen aber auch zusätzliche Maßnahmen der Luftreinhaltung. Die Abnahme ist besonders deutlich an den verkehrsnahen Probenahmestellen, was in Abbildung 5-4 zu erkennen ist. Dort sind die Jahresmittelwerte von 2015 bis 2021 gemittelt über die Anzahl der Probenahmestellen des Basismessnetzes dargestellt, unterschieden zwischen verkehrsnahen Probenahmestellen und städtischem Hintergrund. Die Differenz zwischen den Werten an verkehrsnahen Probenahmestellen und städtischem Hintergrund zeigt den hohen Anteil des lokalen Straßenverkehrs an der NO₂-Konzentration. In diesem Zeitraum weisen die NO₂-Werte einen Rückgang auf, der von 2019 auf 2020 noch etwas stärker ausfällt. Dies ist zu einem geringen Teil auf die seltenere Nutzung von Kraftfahrzeugen während der COVID-19-Pandemie zurückzuführen (PLASS-DÜLMER et al. 2020). Im Jahr 2021 sind die Werte auf einem vergleichbaren Niveau wie 2020 geblieben.

4.2 Feinstaub PM₁₀

Nach der 39. Bundesimmissionschutzverordnung §1 ist PM₁₀ definiert als „Partikel, die einen gröbenselektierenden Luftenlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 Mikrometern einen Abscheidegrad von 50 Prozent aufweist“. Durch Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität, wie die Altanlagenentstaubung, sind die PM₁₀-Konzentrationen deutlich gesunken. Der derzeit europaweit gültige Grenzwert (siehe Tabelle 5-1) für den Jahresmittelwert wird seit 2005 in NRW überall sicher eingehalten. PM₁₀ ist trotz der gesunkenen Werte generell weiter relevant für den Gesundheitsschutz, da keine Wirkschwelle bekannt ist, unter der die Feinstaubkonzentration keine Gesundheitsbeeinträchtigungen hervorruft (WORLD HEALTH ORGANISATION 2021).

In Abbildung 5-5 ist beispielhaft die Anzahl der Überschreitungstage in der vielbefahrenen Gladbecker Straße in Essen dargestellt. Von 2004 bis 2011 wurden in den meisten Jahren mehr als die erlaubten 35 Überschreitungstage pro Jahr (siehe Tabelle 5-1) ermittelt, danach gab es keine Überschreitung mehr. Im Jahr 2021 betrug die höchste gemessene Anzahl an Überschreitungstagen

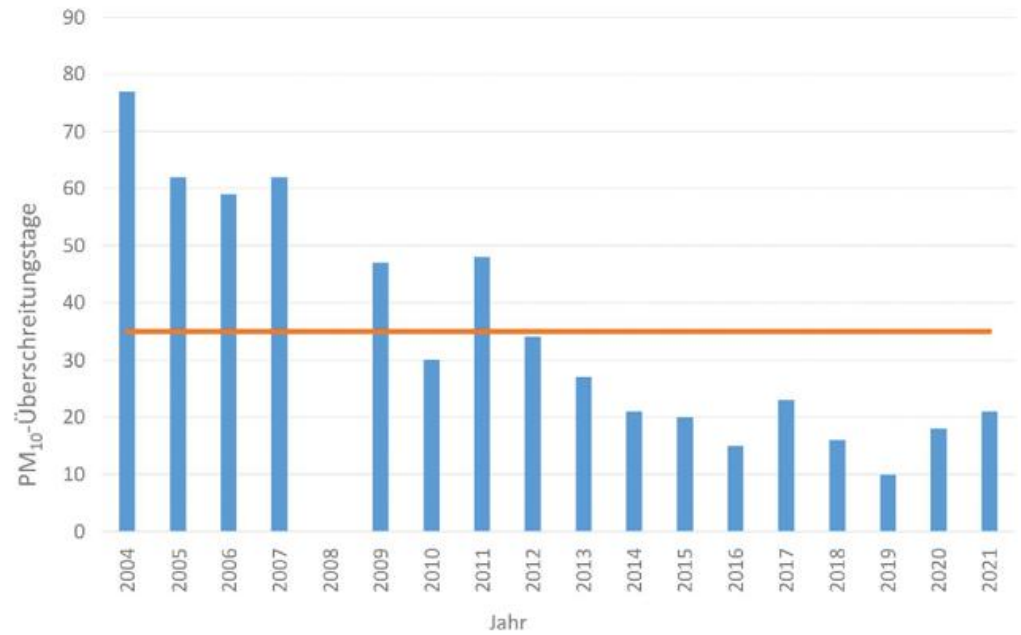


Abbildung 5-5: Trend der Anzahl an Überschreitungstagen, an denen der PM₁₀-Tagesmittelwert in der Gladbecker Straße in Essen über 50 µg m⁻³ lag. Die Anzahl der erlaubten 35 Überschreitungstage ist als orangefarbene Linie dargestellt. Im Jahr 2008 erfolgte keine Messung.

in NRW 21 am Messort Gladbecker Straße in Essen. In ganz NRW gab es seit 2014 nur im Jahr 2018 an einer Station eine Überschreitung der erlaubten 35 Tage (36 Überschreitungstage). Hierbei handelt es sich um einen industriell geprägten Standort mit ungünstiger Gemengelage.

In Abbildung 5-6 sind die Jahresmittelwerte von PM₁₀ der Jahre 2015 bis 2021 dargestellt. Es wurden die Probenahmestellen des Basismessnetzes ausgewertet und zwischen Probenahmestellen mit verkehrsnahem Standort und im städtischen Hintergrund unterschieden. Der Unterschied

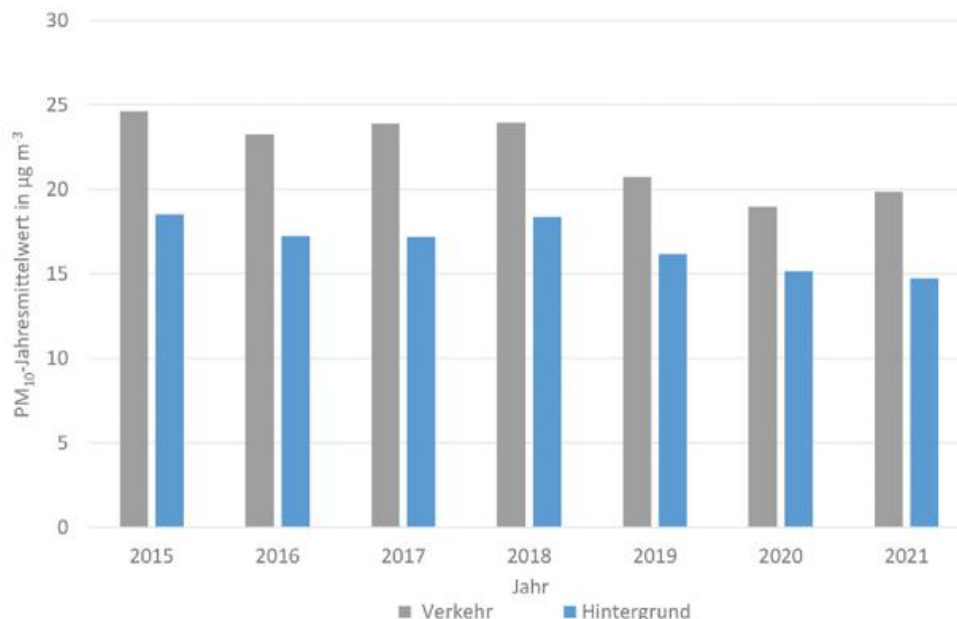


Abbildung 5-6: Trend der PM₁₀-Jahresmittel in µg m⁻³ gemittelt über die Verkehrs- bzw. städtischen Hintergrundstationen der Metropolregion Rhein-Ruhr.

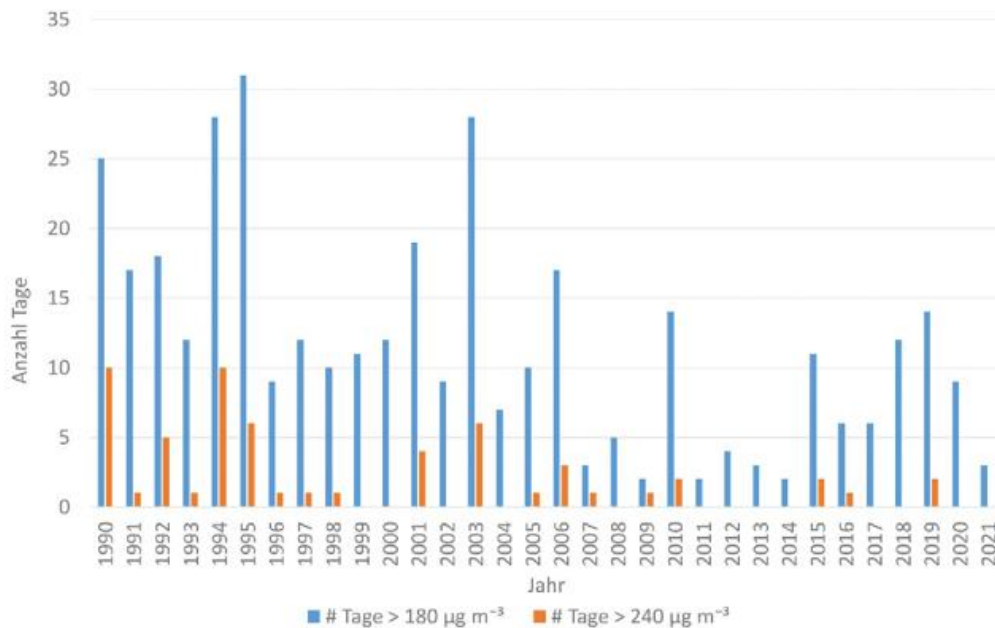


Abbildung 5-7: Trend der Ozon-Belastung in NRW anhand der Anzahl der Tage mit mindestens einem Stundenwert an einer Station über 180 µg m⁻³ (blaue Balken) bzw. 240 µg m⁻³ (orangefarbene Balken).

zwischen Verkehrs- und Hintergrundstationen ist weniger ausgeprägt als bei NO₂. Daraus lässt sich ableiten, dass, anders als bei NO₂, der größte Teil der PM₁₀-Konzentration in den Innenstädten nicht durch den lokalen Straßenverkehr verursacht wird, sondern durch die großflächig vorhandene regionale PM₁₀-Hintergrundkonzentration, die auch durch den Ferntransport von Partikeln aus anderen Regionen hervorgerufen wird, sowie die längere Verweildauer von PM₁₀ im Vergleich zu NO₂ (SEINFELD und PANDIS 2016). Die PM₁₀-Konzentration im städtischen Hintergrund ist nur etwa 5 bis 10 µg m⁻³ (ca. 25 bis 30 %) niedriger als an verkehrsnahen Probenahmestellen. Auch Industrie und Hausbrand sind Verursacher von Feinstaub. Gerade die Verbrennung von Holz in Kaminöfen leistet in NRW einen signifikanten Beitrag zur Feinstaubkonzentration während des Winterhalbjahrs. Im Winterhalbjahr treten auch vermehrt hohe PM₁₀-Konzentrationen auf, da die Wahrscheinlichkeit von Inversionswetterlagen deutlich höher ist als im Sommerhalbjahr. Dies erhöht die Relevanz der Holzfeuerung gerade in Hinblick auf Überschreitungstage. Nach Auswertungen des LANUV trägt sie im Jahresmittel in NRW ca. 2 µg m⁻³ zur Feinstaubkonzentration bei. Holzfeuerung hat in den vergangenen zehn Jahren die Anzahl aller Überschreitungstage in NRW um ca. ein Viertel erhöht. Seit einigen Jahren sind die jährlichen Emissionen durch Holzverbrennung höher als die Abgasemissionen aus dem Straßenverkehr. Beim Straßenverkehr stammt inzwischen jedoch der größte Anteil der PM₁₀-Emissionen aus Aufwirbelungs- und Abriebprozessen, wie Reifenmaterial oder Abrieb beim Bremsen, und nur noch ein geringerer Anteil besteht aus Verbrennungsreaktionen. Nach Auswertungen des LANUV ist darum in Summe die Partikelemission aus dem Straßenverkehr mit über 6000 Tonnen pro Jahr in NRW immer noch höher als die Emission aus der Holzverbrennung mit jährlich etwa 1200 Tonnen in NRW.

4.3 Ozon O₃

Ozon wird nicht direkt freigesetzt, sondern ist ein sekundärer Luftschadstoff, der als Folgeprodukt photochemischer Umwandlungsprozesse in der Luft gebildet wird. Daher zielen Minderungsmaßnahmen auf eine Reduktion von Ozonvorläuferstoffen ab. In NRW wird die bodennahe O₃-Konzentration vor allem im städtischen Hintergrund gemessen, da sie dort höher ist als in Straßenschluchten. NO_x und flüchtige organische Verbindungen (*Volatile Organic Compounds*, VOC) sind die wichtigsten Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung. VOCs haben sowohl anthropogene als auch biogene Quellen. Zu den anthropogenen Quellen zählen unter anderem lösemittelverarbeitende Industrieprozesse, der Straßenverkehr, die Landwirtschaft, aber auch Haushalte und Kleinverbraucher. Biogene Quellen sind alle Lebewesen, wozu auch Pflanzen und Mikroorganismen zählen. So tragen Bäume zum Beispiel ungefähr 20 % zu den VOC-Emissionen bei. In den vergangenen Jahren gab es etliche gesetzliche Regelungen, die erfolgreich zur Minderung der Vorläufersubstanzen aus den Bereichen Industrie, Kraftfahrzeuge, Lösemittel und Farben führten. Diese Reduktion lässt eine Abnahme der Ozonspitzenwerte an sich erwarten, aber auch eine Verringerung der Häufigkeit von sehr hohen O₃-Werten. Diese Abnahme zeigt sich von Mitte der 1990er Jahre bis zum Jahr 2014.

Abbildung 5-7 zeigt für die Jahre 1990 bis 2021 die Anzahl der Tage in NRW, an denen an mindestens einer Station Ozonstundenwerte von mehr als 180 µg m⁻³ beziehungsweise von über 240 µg m⁻³ beobachtet wurden. Nach dem Jahr 2014 sind mehrere Jahre mit erhöhten Ozonspitzenwerten zu erkennen. Dies ist auf eine Folge warmer trockener Jahre zurückzuführen. Sonne und Trockenheit führen zu mehr Ozonbildung durch Photochemie. Zudem emittieren Bäume bei steigenden Temperaturen deutlich mehr VOCs (GROTE

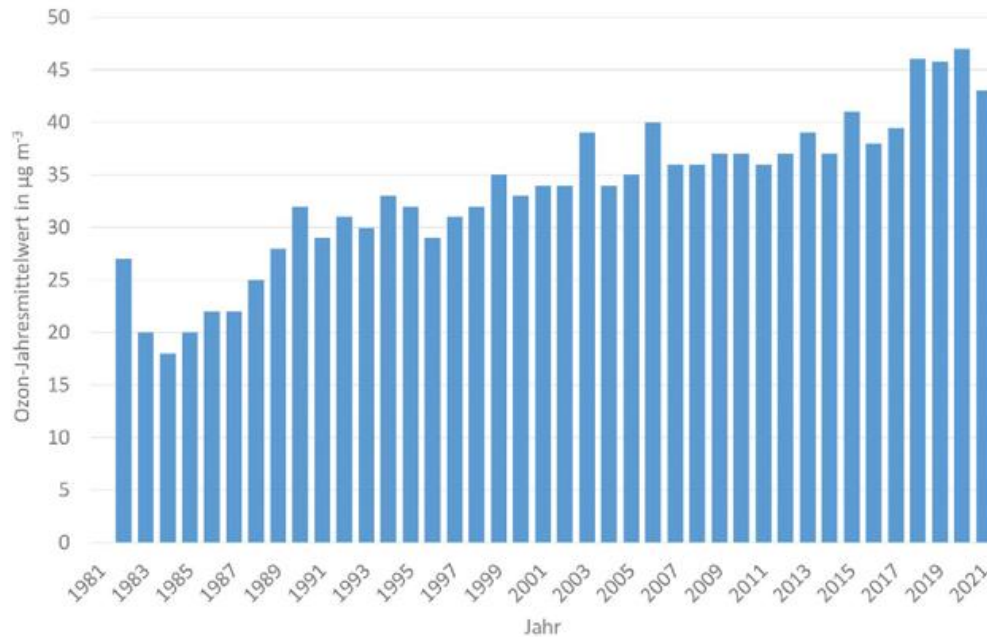


Abbildung 5-8: Ozon-Jahresmittelwerte im städtischen Hintergrund im Rhein-Ruhr-Gebiet. Dargestellt ist der Mittelwert aller langjährig O₃-messenden städtischen Hintergrundstationen im Rhein-Ruhr-Gebiet seit 1982.

2009, WAGNER und KUTTLER 2014). Beide Prozesse tragen zur Erhöhung der O₃-Werte, insbesondere an mit entsprechenden Bäumen bestandenen Straßenzügen, bei.

Wie unter anderem eine Studie des UBA zeigt, wären die Werte ohne Minderungsmaßnahmen noch höher ausgefallen (UBA 2021). Generell ist deutlich der Effekt des Wetters auf die O₃-Spitzenwerte und -Jahresmittelwerte zu sehen, wie zum Beispiel die besonders heißen und trockenen Jahre 2003 und 2006 sowie der Zeitraum 2018 bis 2021. In Abbildung 5-8 ist der über alle langjährig O₃-messenden Stationen gemittelte O₃-Jahresmittelwert (1982–2021) an städtischen Hintergrundstationen im Rhein-Ruhr-Gebiet dargestellt. Die Jahresmittelwerte nehmen zu. Ein Grund für dieses auch weltweit zu beobachtende Phänomen ist der Anstieg der weltweiten Emissionen von Ozonvorläufer-substanzen in den letzten 40 Jahren (IPCC 2021), hierbei spielt auch die NO_x-Emission aus dem zunehmenden Luftverkehr eine wesentliche Rolle (WANG et al. 2022). Die europäischen Maßnahmen reduzieren lokal die Ozonspitzenwerte, doch die großräumige Ozonkonzentration nimmt trotzdem zu.

5 Fazit zur Wechselwirkung städtischer Klimaschutzmaßnahmen und der Luftqualität

Bei der Erhöhung der Luftqualität als Bestandteil des Stadtklimas wurden bereits viele Verbesserungen erreicht. Doch wie wirken sich die städtischen Maßnahmen zu Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel auf die Luftqualität in unseren Städten aus? Einige wesentliche Maßnahmen und ihre Wirkungen sind im Folgenden aufgelistet.

Eine Verkehrswende (zu weniger motorisiertem Individualverkehr) ist für die Luftqualität eindeutig positiv. Weniger

Kraftfahrzeuge auf den Straßen führen zu weniger Emissionen von Luftschadstoffen.

Ein Umstieg auf Elektroautos ist – bei emissionsarmer bzw. emissionsfreier Stromerzeugung – positiv in Bezug auf die Emission einzelner Schadstoffe. Ein hoher Anteil an Elektrofahrzeugen kann eine deutliche Minderung der NO₂-Konzentrationen erzielen (Abb. 5-9). Feinstaubemissionen durch Kraftfahrzeuge stammen dagegen in erster Linie aus Aufwirbelung und Reifenabrieb und nur zu einem sehr geringen Anteil aus Auspuffemissionen. Hier führen Elektroautos zu keiner Minderung, im schlimmsten Fall kann das höhere Gewicht sogar zu einer Zunahme der Emissionen und damit einer Zunahme der PM₁₀-Freisetzung führen.

Die konventionelle Stromerzeugung für E-Antriebe hat eher einen indirekten Einfluss, da sie sich vor allem auf die Hintergrundkonzentration auswirkt. Damit ist sie nicht spezifisch für eine Stadt, sondern wirkt sich auf ein weiträumiges Gebiet aus. Verminderte Schadstoffemissionen aus der Stromerzeugung können sich also positiv auch auf die Gesamtkonzentration an Belastungsschwerpunkten in einer Stadt auswirken, da dadurch die Hintergrundkonzentration gesenkt wird.

Holzfeuerung wirkt sich negativ auf die Luftqualität aus, da insbesondere die Feinstaubkonzentration zunimmt. Fernwärme und Erdwärme sind tendenziell positiv bis neutral zu bewerten, wobei hier auch die Erzeugung der Fernwärme entscheidend ist.

Eine Begrünung kann als positiv bis neutral eingestuft werden, wenn dabei keine geschlossene Überdachung einer Straße den Luftaustausch behindert (PAULEIT et al. 2023). Generell ist die Wirkung von Vegetation auf die PM₁₀- und

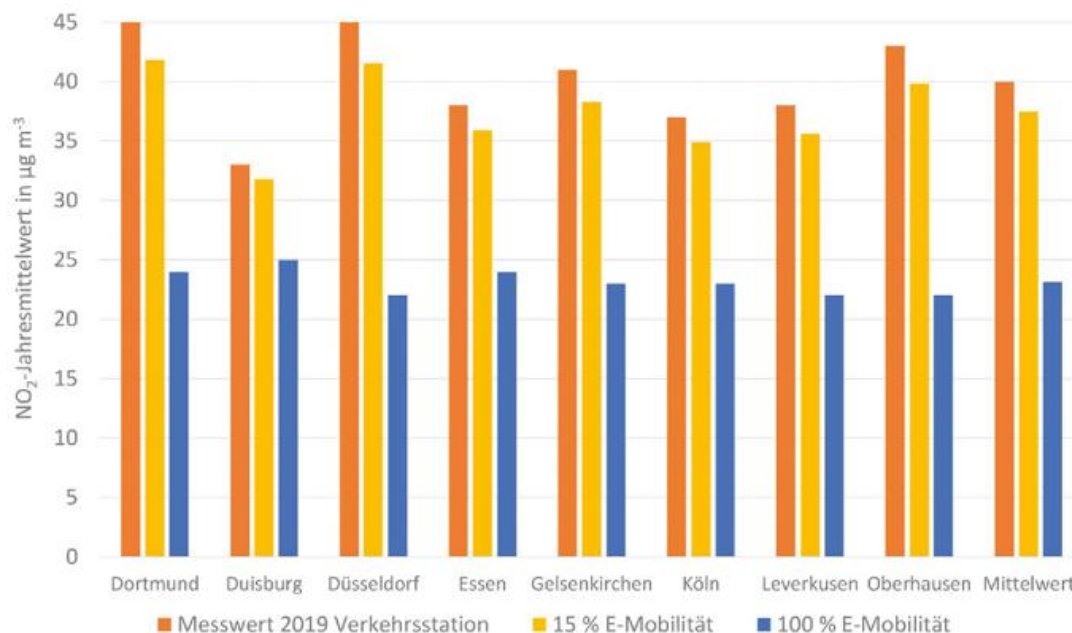


Abbildung 5-9: Abschätzung, wie sich im Jahr 2019 unterschiedliche Anteile von elektrischen Fahrzeugen (E-Mobilität) auf die NO₂-Konzentration in stark befahrenen Straßen im Ruhrgebiet ausgewirkt hätten.

NO₂-Konzentrationen sehr lokal. Ein Problem bei Vegetation stellt O₃ dar. Bäume emittieren bei Hitze- und Trockenstress O₃-Vorläuferstoffe, was zu einer Zunahme der O₃-Konzentrationen führen kann. Die Stärke der Emission hängt von der Baumart ab. Wird bei Neupflanzungen darauf geachtet, Baumarten zu wählen, die wenig VOCs emittieren, kann das Problem zumindest vermindert werden. Trockenstress der Bäume kann durch Bewässerung verringert werden. Klimaschutzmaßnahmen zur Reduktion von Methan haben nur einen geringen Effekt auf die Reduktion von O₃, tragen damit aber zu einer Verbesserung der Luftqualität bei.

Frischluftschneisen für Kaltluftzufuhr als Klimaanpassungsmaßnahme sind tendenziell auch positiv für die Luftqualität, wenn sie die Zufuhr unbelasteter beziehungsweise gering belasteter Luft bewirken (KUTTLER und GROSS 2023).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich alles in allem Maßnahmen zur Kühlung insgesamt tendenziell gut bis neutral auf die Luftqualität auswirken. Idealerweise werden Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität und zur Verbesserung des Stadtklimas gemeinsam geplant und unterstützen sich gegenseitig.

Literatur

39. BImSchV: 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes: Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen. Abruf am 27.01.2023, URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/index.html.
2008/50/EG: Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über

Luftqualität und saubere Luft für Europa (ABl. L 152 vom 11.6.2008). 1-44. Abruf am: 18.04.2023, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=de>.
BRUCKMANN, P., PFEFFER, U., HOFFMANN, V., 2014a: 50 years of air quality control in Northwestern Germany – how the blue skies over the Ruhrdistrict were achieved. Part I. *Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft* **74**, 1/2, 37-44.
BRUCKMANN, P., PFEFFER, U., HOFFMANN, V., 2014b: 50 years of air quality control in Northwestern Germany – how the blue skies over the Ruhrdistrict were achieved. Part II. *Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft* **74**, 1/2, 142-150.
EURAD-IM, 2018: Informationen zum European Air pollution Dispersion-Inversion Modell (EURAD-IM) von der Universität zu Köln / ELBERN, H. Abruf am 18.04.2023, URL: <https://eurad.uni-koeln.de/forschung/chemische-datenassimilation/eurad-im>.
FRANCO, V., SANCHEZ, F., GERMAN, J., MOCK, P., 2014: Real world exhaust emissions from modern diesel cars – a meta-analysis of PEMS emissions data from EU (EURO 6) and US (TIER 2 BIN 5/ULEV II) diesel passenger cars, Part I: Aggregated results. The International Council on Clean Transportation Europe (Hrsg.). Abruf am 27.01.2023, URL: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_PEMS-study_diesel-cars_20141010.pdf.
GROTE, R., 2009: Welche Rolle spielen Kohlenwasserstoff-Emissionen aus den Wäldern für die Forstwirtschaft der Zukunft? *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **181**, 77-81.
INFORMATION UND TECHNIK NRW, 2023: Landesdatenbank NRW. Online-Veröffentlichungsplattform des Landesbetriebs Information und Technik Nordrhein Westfalen, Statistisches Landesamt. Abruf am

- 13.04.2023, URL: <https://www.landesdatenbank.nrw.de/ldbnrw/online>.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PIRANI, A., CONNORS, S.L., PÉAN, C., BERGER, S., CAUD, N., CHEN, Y., GOLDFARB, L., GOMIS, M.I., HUANG, M., LEITZELL, K., LONNOY, E., MATTHEWS, J.B.R., MAYCOCK, T.K., WATERFIELD, T., YELEKÇI, O., YU, R., ZHOU, B. (Hrsg.)]. *Cambridge University Press*, doi:10.1017/9781009157896.
- KBA, 2022: Fahrzeuge. Website Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Abruf am 18.04.2022, URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/fahrzeuge_node.html.
- KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.
- KUTTLER, W., HOLLOSI, B., GUBLER, M., 2023: Stadtklimatologie im Wandel der Zeit – Einblicke aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 125-141.
- PAULEIT, S., ERLWEIN, S., LINKE, S., RAHMAN, M., ZÖLCH, T., RÖTZNER, T., 2023: Grün-blaue Infrastruktur für die Klimawandelanpassung der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 79-88.
- PLASS-DÜLMER, C., GILGE, S., DAUERT, U., KESSINGER, S., MINKOS, A., 2020: Reduktion von Stickoxiden in deutschen Städten nach Corona-Lockdown. Materialien, Methoden und Analysen zum GAW Brief 76 des DWD. Abruf am 18.04.2022, URL: https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/hohenpeissenberg/download/gaw_briefe/gaw_brief_076_hintergrundpapier_de_pdf.
- SEINFELD, J.H., PANDIS, S.N., 2016: Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change. *John Wiley & Sons*, 1152.
- STEIGER, H., BROCKHAUS, A., 1966: Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Luftverunreinigungen und Mortalität im Ruhrgebiet. *Naturwissenschaften* **53**, 498-498.
- UBA, 2021: Ozonbelastung. Website Umweltbundesamt (UBA). Abruf am 18.04.2023, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/ozon-belastung#uberschreitung-von-schwellenwerten>.
- WAGNER, P., KUTTLER, W., 2014: Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere – A case study in Essen, Germany. *Science of the Total Environment* **475**, 104-115.
- WANG, H., LU, X., JACOB, D.J., COOPER, O.R., CHANG, K.-L., LI, K., GAO, M., LIU, Y., SHENG, B., WU, K., WU, T., ZHANG, J., SAUVAGE, B., NEDELEC, P., BLOT, R., FAN, S., 2022: Global tropospheric ozone trends, attributions, and radiative impacts in 1995–2017: an integrated analysis using aircraft (IAGOS) observations, ozonesonde, and multi-decadal chemical model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics* **22**, 13753-13782, doi:10.5194/acp-22-13753-2022.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021: WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization (Hrsg.), 273 S., <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.

Kontakt

DR. SABINE WURZLER

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Abteilung 4: Luftqualität, Geräusche, Erschütterungen,
Strahlenschutz
Leibnizstr. 10
45659 Recklinghausen
sabine.wurzler@lanuv.nrw.de

DR. HEIKE HEBBINGHAUS

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Abteilung 4: Luftqualität, Geräusche, Erschütterungen,
Strahlenschutz
Leibnizstr. 10
45659 Recklinghausen
heike.hebbinghaus@lanuv.nrw.de

LISA ROGALLA, M.SC.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Abteilung 4: Luftqualität, Geräusche, Erschütterungen,
Strahlenschutz
Leibnizstr. 10
45659 Recklinghausen
lisa.rogalla@lanuv.nrw.de

NATASCHA BECK, M.SC.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Abteilung 4: Luftqualität, Geräusche, Erschütterungen,
Strahlenschutz
Leibnizstr. 10
45659 Recklinghausen
natascha.beck@lanuv.nrw.de

ANJA KLOSTERKÖTHER, M.SC.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Abteilung 4: Luftqualität, Geräusche, Erschütterungen,
Strahlenschutz
Leibnizstr. 10
45659 Recklinghausen
anja.klosterkoether@lanuv.nrw.de

DR. JUTTA GEIGER

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Abteilung 4: Luftqualität, Geräusche, Erschütterungen,
Strahlenschutz
Leibnizstr. 10
45659 Recklinghausen
jutta.geiger@lanuv.nrw.de

6

A. MATZARAKIS

Hitze in Städten – Quantifizierung, Warnsysteme und Hitzeaktionspläne zum Schutz der menschlichen Gesundheit

Urban heat – quantification, warning systems and heat action plans to protect human health

Zusammenfassung

Die Human-Biometeorologie ist ein Teilbereich der Biometeorologie, der die Auswirkungen der atmosphärischen Umwelt auf den Menschen behandelt. Dabei werden nicht nur der globale Klimawandel, sondern auch meteorologische Extremsituationen (z. B. Hitzewellen) sowie langfristige Planungsaspekte, wie die Gestaltung von Stadtquartieren oder auch Grünflächen betrachtet. Es werden Methoden angewendet, die über einzelne meteorologische Größen hinausgehen und die eine interdisziplinäre Betrachtungsweise und Umsetzung erfordern. Bestes Beispiel dazu ist die Entwicklung von Hitzewarnsystemen, die auch Untersuchungsaspekte der Bewohnerinnen und Bewohner in Städten, Merkmale der urbanen Wärmeinsel sowie der Innenräume beinhalten. Die Umsetzung kann mithilfe von thermisch objektiven Bewertungsgrößen durchgeführt werden, die auch auf unterschiedlichen Planungsebenen und in Gestaltungsmöglichkeiten von Gebäuden und Außenanlagen einfließen können.

Summary

Human biometeorology is a subtopic of biometeorology that deals with the effects of the atmospheric environment on humans. Thereby not only anthropogenic climate change but also extreme meteorological situations (e.g. heat waves) as well as long-term aspects such as the design of urban neighbourhoods or green spaces are considered. Methods that go beyond individual meteorological variables are applied and require an interdisciplinary approach and implementation. The best example for this is the development of heat warning systems, which also include aspects of the inhabitants in cities, characteristics of the urban heat island as well as indoor conditions. Their implementation can be achieved with the help of thermal assessment variables, which are also reflected in the different planning levels and design options for buildings and outdoor facilities.

1 Einleitung

Die Biometeorologie ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die sich mit den Wechselwirkungen zwischen atmosphärischen Prozessen und lebenden Organismen (Pflanzen, Tiere, Menschen) befasst. Die zentrale Aufgabe der Biometeorologie ist die Bestimmung der Einflüsse von Wetter, Witterung, Klima und Klimawandel auf lebende Organismen. Bezogen auf den Menschen, wird die Biometeorologie als Human-Biometeorologie oder – wenn es direkt um Gesundheitsfragen geht – als Medizin-Meteorologie bezeichnet (MATZARAKIS 2020; www.dwd.de/lexikon).

Es ist seit langem bekannt, dass in Bezug auf die Bestimmung der Wirkung von Umweltfaktoren meistens mehrere Komponenten gleichzeitig im Spiel sind. Man kann aber basierend auf den Wirkungswegen (Atmung, Haut, Nahrung, Sinne) den Einfluss auf Menschen in sogenannte Wirkungskomplexe zusammenfassen. In Bezug auf die atmosphärische Umwelt werden folgende Wirkungskomplexe unterschieden (Abb. 6-1), die im Rahmen stadtklimatologischer Untersuchungen eine wesentliche Rolle spielen (VDI 2022):

- Aktinischer Wirkungskomplex (Strahlung): Der aktinische Wirkungskomplex behandelt die Komponenten

der biologisch wirksamen Sonnenstrahlung; sie reichen vom infraroten über den sichtbaren bis zum UV-Bereich. Bekanntestes Beispiel ist die Wirkung der Sonne auf die Haut (Sonnenbrand, Hautkrebs, Bildung von Vitamin D).

- Lufthygienischer Wirkungskomplex: Er fasst die Wirkung der natürlichen und der künstlich verursachten Luftbeimengungen auf den Menschen zusammen. Zu diesen zählen Grob- und Feinstaub, Pollen sowie gasförmige und flüssige Luftinhaltsstoffe.
- Thermischer Wirkungskomplex: Es werden die Größen berücksichtigt, die für den Austausch von Wärme zwischen dem lebenden Organismus und der Atmosphäre von Bedeutung sind. Die wichtigsten meteorologischen Größen sind dabei Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwellige Strahlung. Primär geht es in diesem Zusammenhang um die Wirkungen von Strahlung, Hitze und Kälte auf Menschen.

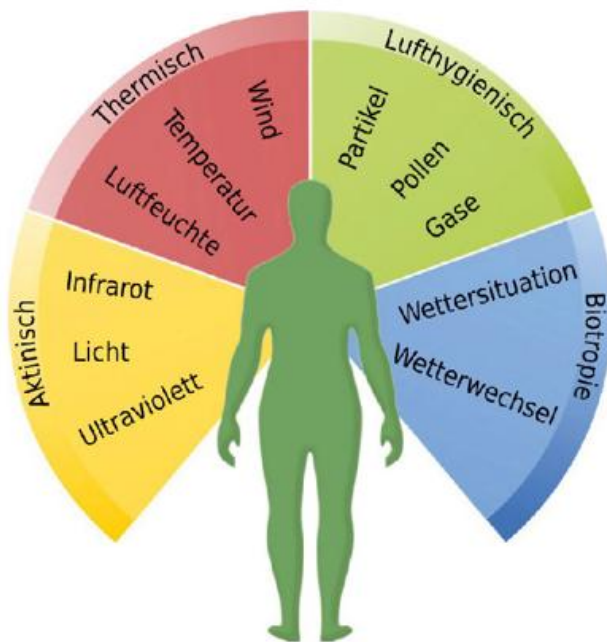


Abbildung 6-1: Atmosphärische Wirkungskomplexe (DWD).

Für das Stadtklima (KUTTLER und GROSS 2023) spielt der thermische Wirkungskomplex eine wichtige Rolle, weil er durch stadtplanerische Maßnahmen in gewissen Grenzen beeinflusst werden kann. Im Rahmen dieses Beitrags werden nur der thermische Wirkungskomplex sowie entsprechende Anwendungsbeispiele behandelt. Ziel des Beitrags ist es auch, die Faktoren anzusprechen, die nicht nur stadtplanerisch relevant sind, sondern auch Maßnahmen im Zuge des Klimawandels darstellen. Es geht darum, Maßnahmen zielgerecht umzusetzen und Prävention zu betreiben. Dazu gehören auch der Einsatz und die Betreuung von Frühwarnsystemen (z. B. das Hitzewarnsystem des DWD zum Schutz der menschlichen Gesundheit). Dies ist besonders von Bedeutung für Städte, weil hier die meisten Betroffenen (z. B. Risiko- und vulnerable Bevölkerungsgruppen) leben.

2 Methoden

2.1 Bewertungs- und Quantifizierungsmöglichkeiten

Der menschliche Organismus ist ein Temperatur-Regler, der auf das Einwirken der thermischen Umwelt autonom und durch Prozesse der Verhaltensanpassung reagiert. Diese Einflüsse sind vielfältig und wirken sich in komplexer Weise auf die Energiebilanz eines Organismus aus. Ziel ist die Regulation einer Gleichgewichtstemperatur von ca. 37 °C. Im Zentralnervensystem verursachte (Temperatur-) Abweichungen von Vergleichswerten für die Regulation werden dem Menschen rasch bewusst. Sie steuern über diesen kognitiven Prozess sowohl das (subjektive) thermische Empfinden des durch die Umwelt ausgelösten thermischen Stresses als auch durch die thermische Beanspruchung, die darüber hinaus andere, nicht thermische Regelkreise betrifft (ISO 2004b). Hierzu zählen zum Beispiel das Herz-Kreislaufsystem, womit beispielsweise Einschränkungen der physischen und/oder der kognitiven Leistungsfähigkeit verbunden sein können. Die Energiebilanz des menschlichen Organismus wird durch die thermische Umwelt nachhaltig beeinflusst. Diese wird beschrieben durch die meteorologischen Elemente Lufttemperatur T_a (°C), Wasserdampfdruck VP (hPa) bzw. relative Feuchte RH (%), Windgeschwindigkeit v ($m s^{-1}$) und mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} (°C). In der Energiebilanz bzw. dem Energiehaushalt des Menschen werden neben den bekannten Termen Strahlungsbilanz, fühlbaren sowie latenten Wärmeströmen auch thermo-physiologische Einflussgrößen betrachtet, wie die Wärmeproduktion des Menschen und auch Schweißverdunstung. Meistens werden die thermo-physiologischen Faktoren standardisiert, wozu die Art der Bekleidung des Menschen und seine Aktivität bzw. Wärmeproduktion zusammengefasst werden. Die Thermoregulation strebt eine ausgeglichene Energiebilanz an. Von einem mathematischen Standpunkt aus kann sie in zwei interagierende Systeme getrennt werden (VDI 2022):

- Das (steuernde) aktive System mit den thermoregulativen Antworten des Zentralnervensystems auf Temperaturabweichungen von Neutralwerten für Körperkern und -schale, die sich in Erweiterung oder Verengung des peripheren Gefäßsystems und damit den peripheren Blutfluss, in Schweißabsonderung und in Kältezittern auswirken.
- Das (gesteuerte) passive System mit den anatomischen Eigenschaften und den Wärmetransportphänomenen innerhalb des Organismus und an seiner Oberfläche.

Insgesamt handelt es sich um die Beschreibung des thermischen Empfindens, das eine kognitive Bewertung des thermischen Status des Körpers und seiner thermischen Umgebung darstellt (IUPS 2003). Physiologisch wird es vermittelt über die Thermorezeptoren in Körperschale und Körperkern. Bei identischer thermischer Umwelt kann das thermische Empfinden von Menschen individuell stark variieren. Thermischer Komfort ist ein Teilaspekt des thermischen Empfindens und wird als „der Zustand des Bewusst-

seins, der Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung“ definiert. Seine Beurteilung leitet sich aus einem kognitiven Prozess ab, der viele, darunter besonders physikalische, physiologische und psychologische Einflüsse beinhaltet (ASHRAE 2013). Die Definition umfasst Schlüsse über thermischen Komfort und thermisches Unbehagen aus direktem Temperatur- und/oder Feuchteempfinden, Temperaturen des Körperinneren sowie erforderliche Anstrengungen, die Körpertemperaturen zu regulieren.

Ursprünglich ist der Begriff des thermischen Komforts für Innenräume entwickelt worden, um optimale Bedingungen zu beschreiben. Er setzt eine ausgeglichene Energiebilanz voraus (stationärer Zustand), die sich für Menschen in Innenräumen einfacher gestaltet. In Innenräumen können Menschen die Bedingungen bis zu einer Genauigkeit von ca. 3 °C beschreiben. Obwohl regionales Klima, Lebensumstände und Kulturen weltweit differieren, wählen Menschen unter vergleichbaren Bedingungen von Kleidung, Aktivität, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit sehr ähnliche Temperaturen für die thermische Einschätzung.

Die Voraussetzungen für thermischen Komfort, wie er ursprünglich für Innenräume definiert wurde, sind für Außenbedingungen häufig nicht gegeben. Im Freien können die relevanten meteorologischen Größen in Bezug auf ihre Messwerte schwanken, zum Beispiel durch die Böigkeit des Windes oder durch Bewölkung, die die direkte Sonneneinstrahlung an einem Standort zeitlich variabel abschwächen kann. Ein vergleichbarer Begriff für die Bewertung im Freien steht leider nicht zur Verfügung. Die thermische Bewertung auf Basis von Energiebilanzmodellen beruht daher auf eindeutig definierten Referenzpersonen, deren thermischer Zustand als Abweichung von einer thermischen Neutralität beschrieben wird, die unter freier Wahl der thermischen Umgebung (z. B. in einer Klimakammer) erreichbar wäre. Sie kann damit als objektiv bewertet werden für eine größere Stichprobe der Bevölkerung und durch den Bezug zum neutralen Empfinden, unabhängig von individuellem Befinden oder regional-kulturellen Einflüssen. Basierend auf diesen objektiven Betrachtungen, kann die thermische Bewertung anschließend durch adaptive Methoden (Anpassung von thermischen Bewertungsklassen) ergänzt werden.

Für die Bewertung der thermischen Umgebung wird das Konzept äquivalenter Temperaturen angewandt, die

- einerseits die vollständige Energiebilanz für den menschlichen Organismus lösen,
- andererseits der Lufttemperatur in einer hypothetischen Referenzumgebung entsprechen, in der eine Referenzperson identische Werte ausgewählter thermophysiologicaler Größen aufweisen würde wie in der aktuellen Umgebung.

Dies ermöglicht intuitiv eine thermische Bewertung über den Vergleich mit der aktuellen Lufttemperatur. Die Fest-

legung auf das Konzept äquivalenter Lufttemperaturen schließt Modelle aus, die ebenfalls von der vollständigen Energiebilanzgleichung ausgehen aber nicht in einem Temperaturindex münden, beispielsweise das *Predicted Mean Vote* (PMV; FANGER 1972), oder die erforderliche Schweißrate als Index (ISO 2004a) oder nur die Energiebilanz lokaler Hautpartien berücksichtigen. Die Referenzumgebung wird immer als isotherm angenommen, das heißt $T_{mrt} = T_a$, und weist eine nur geringe Windgeschwindigkeit auf, die so niedrig ist, dass sie bei der Referenzperson gerade zu erzwungener Konvektion führen würde. Bei der Luftfeuchte der Referenzumgebung differieren die Ansätze stärker. Detaillierte Darstellungen über die thermischen Indizes enthält die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (VDI 2022). Diese Richtlinie bildet die Grundlage für die Beurteilung der thermischen Komponente des Human-Bioklimas und wird zum größten Teil für Fragestellungen im Bereich der Stadtklimatologie sowie städtischen Umgebungen (Mikroklima) verwendet.

In diesem Beitrag werden nur die Gefühlte Temperatur (GT) und die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) vorgestellt, weil diese am meisten im deutschsprachigen Raum verwendet werden.

2.1.1 Gefühlte Temperatur

Zur Bewertung der thermischen Belastung verwendet der Deutsche Wetterdienst ein mathematisches Modell des Energieaustauschs des menschlichen Organismus mit seiner Umgebung. Der Energieaustausch erfolgt über Strahlungsflüsse sowie über den turbulenten Austausch fühlbarer und latenter Wärme. Daraus ergeben sich vier grundlegende Umweltfaktoren, welche die Reaktion des menschlichen Körpers auf die thermische Umgebung bestimmen: Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur (umfasst alle kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse), Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit (JENDRITZKY 1990). Bei der Untersuchung der Wirkung von Wärme auf den Menschen ist daher eine Quantifizierung dieser vier Einflussgrößen unerlässlich (PARSONS 2014). Zusammen mit der metabolischen Rate und der getragenen Kleidung bilden die genannten meteorologischen Elemente die sechs fundamentalen Einflussfaktoren, welche die Bedingungen des Wärmeaustausches zwischen Mensch und Umwelt beschreiben können. Um die thermische Umwelt gesundheitsrelevant bewerten zu können, wird beim Deutschen Wetterdienst die Gefühlte Temperatur verwendet (JENDRITZKY 1990, STAIGER et al. 1997, 2012). Der Energie- bzw. Wärmeaustausch wird für einen Standard-Menschen modelliert, den sogenannten Klima-Michel. Dieser Standard-Mensch passt seine Bekleidung soweit an, dass er nach Möglichkeit im thermischen Komfortbereich bleibt. Die Gefühlte Temperatur lässt sich thermischen Belastungsstufen zuordnen (Tabelle 6-1). Diese sind angelehnt an die thermischen Belastungsklassen der *American Society of Heating, Refrigerating and Engineering* (ASHRAE; FANGER 1972).

Tabelle 6-1: Gefühlte Temperatur (GT), thermisches Empfinden und entsprechende thermophysiologische Belastungsstufe (nach VDI 2022).

Gefühlte Temperatur (°C)	Thermisches Empfinden	Belastungsstufe
≤ -39	sehr kalt	-4: extremer Kältestress
> -39 bis -26	kalt	-3: starker Kältestress
> -26 bis -13	kühl	-2: mäßiger Kältestress
> -13 bis 0	leicht kühl	-1: leichter Kältestress
> 0 bis < 20	begeglich	0: kein thermischer Stress
20 bis < 26	leicht warm	1: leichte Wärmebelastung
26 bis < 32	warm	2: mäßige Wärmebelastung
32 bis < 38	heiß	3: starke Wärmebelastung
≥ 38	sehr heiß	4: extreme Wärmebelastung

2.1.2 Physiologisch äquivalente Temperatur

Die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) beschreibt die menschliche Reaktion auf die thermische Umwelt und referenziert Bedingungen, die typischen Büroverhältnissen entsprechen. PET ist als rein klimatischer Index konzipiert, der individuelle Verhaltensanpassungen (z. B. Bekleidungsänderung) nicht berücksichtigt.

PET stellt die Lufttemperatur einer hypothetischen Referenzumgebung dar, in der eine Standardperson im stationären Zustand dem gleichen Wärme-/Kältestress ausgesetzt ist, der durch die mittlere Hauttemperatur $t_{sk,mean}$ und die gleiche thermoregulative Beanspruchung (gegeben durch Kerntemperatur bzw. Schweißrate) gesteuert wird. Als Referenzperson wird ein Mensch bezeichnet, der 35 Jahre alt, 1,75 m groß ist und 75 kg wiegt. Seine Tätigkeit entspricht einer Bürotätigkeit (80 W) und seine Kleidung einem leichten Sommeranzug mit kurzärmeligem Hemd (0,9 clo). Die Referenzumgebung ist gekennzeichnet durch $T_{mrt} = T_{as}$, $VP = 12$ hPa und Windgeschwindigkeit v in 1,1 m über Grund = $0,1$ m s^{-1} . Die thermophysiologische Basis von PET ist das Münchner Energiebilanz-Modell für Indi-

viduen (MEMI; VDI 2022). In MEMI wird die Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers für stationäre Bedingungen für die zu untersuchenden meteorologischen Bedingungen gelöst. Als Ergebnis liefert MEMI die physiologischen Größen Kerntemperatur, Hauttemperatur und Benetzungsgrad, sowie einzelne Wärmeflüsse über Haut und Atemwege. Die Ergebnisse für Kerntemperatur und Hautbenetzung werden in MEMI verwendet und für Referenzbedingungen diejenige Lufttemperatur ermittelt, die zu den gleichen Werten der physiologischen Größen führt. Diese Lufttemperatur ist äquivalent zu PET (VDI 2022). Die Bewertung der berechneten PET-Werte erfolgt nach einer an PMV (*Predicted Mean Vote*) orientierten Bewertungsskala (siehe Tabelle 6-2). Die PMV-Bewertungsskala wurde durch Untersuchungen in Klimakammern an etwa 1300 Personen erstellt, wobei eine Beziehung zwischen einer rechnerisch nicht ausgeglichenen Wärmebilanz und dem subjektiven Empfinden auf einer psychophysischen Skala hergestellt werden konnte (FANGER 1972).

Thermische Behaglichkeit einer Person mit Bürotätigkeit in leichter Sommerbekleidung stellt sich gemäß der Bewertungsskala der PET bei etwa 20 °C ein.

Tabelle 6-2: Kategorisierung der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) in Bereiche unterschiedlichen thermischen Empfindens (nach VDI 2022).

PET in °C	Thermisches Empfinden	Belastungskategorie
PET ≤ 4	sehr kalt	extremer Kältestress
4 < PET ≤ 8	kalt	starker Kältestress
8 < PET ≤ 13	kühl	moderater Kältestress
13 < PET ≤ 18	leicht kühl	leichter Kältestress
18 < PET ≤ 23	komfortabel (neutral)	kein thermischer Stress
23 < PET ≤ 29	leicht warm	leichte Wärmebelastung
29 < PET ≤ 35	warm	moderate Wärmebelastung
35 < PET ≤ 41	heiß	starke Wärmebelastung/Hitzestress
PET > 41	sehr heiß	extrem starke Wärmebelastung

3 Beispiele

3.1 Vergleich der Lufttemperatur mit der gefühlten Temperatur

Der Mensch besitzt keine Sensoren für die Lufttemperatur und erfasst Änderungen bezüglich seiner thermischen Umgebung als Kombinationen aller wirkenden meteorologischen Größen, wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftbewegung sowie Strahlungsverhältnisse. Darüber hinaus wird das Empfinden auch durch seine Aktivität und die Bekleidung beeinflusst. Die Lufttemperatur ist somit nur eine beeinflussende Größe der gefühlten Temperatur. Die gefühlte Temperatur, die wesentlich mehr Einflussfaktoren beinhaltet, ist deshalb nicht mit der Lufttemperatur gleichzusetzen. Um ein besseres Verständnis beider Größen zu erhalten, werden diese hier exemplarisch für verschiedene Standorte in Freiburg für den Sommer 2019 dargestellt. Abbildung 6-2 zeigt Tage, an denen vom DWD Hitzewarnungen für Freiburg im Breisgau herausgegeben wurden. Diese sind orange hinterlegt. Im Sommer 2019 traten in Freiburg im Breisgau fünf Episoden mit Hitzewarnungen auf. Die in der Stadt höheren Temperaturen (sowohl GT_{max} als auch T_{max}) als im Umland (ebenfalls sowohl GT_{max} als auch T_{max}) zeigen sich insbesondere auch während der Zeiten mit Hitzewarnungen. Stadtbewohner sind somit einer besonders hohen Wärmebelastung ausgesetzt. Deutlich zu erkennen ist außerdem, dass in der Stadt GT_{max} grundsätzlich höhere Werte aufweist als T_{max} . Auch im Umland liegt GT_{max} größtenteils über den Werten von T_{max} . Einzelne Ausnahmen sind bei niedrigen gefühlten Temperaturen außerhalb von Tagen mit Hitzewarnungen zu erkennen. Dies könnte mit höheren Windgeschwindigkeiten im Umland zusammenhängen, die zu geringen GT_{max} führen können. Zu beachten ist außerdem, dass die Hitzewarnungen auf der prognostizierten gefühlten Temperatur der numerischen Wettervorhersage zu 12 UTC basieren, während die dargestellten Zeitreihen die täglichen Maxima der gefühlten Temperatur zeigen, die auf Basis der Messdaten der Station Freiburg Mitte (Stadt) und der Station Frei-

burg Flugplatz (Umland) berechnet wurden. Während der zweiten Episode mit Hitzewarnungen (am 27.06.2019) überstieg das Maximum der gefühlten Temperatur in der Stadt dasjenige der Lufttemperatur um bis zu 10 °C (MATZARAKIS 2020). Daraus wird ersichtlich, dass es tagsüber zu großen Unterschieden zwischen der Lufttemperatur und der gefühlten Temperatur kommen kann. Demzufolge zeigt sich, dass nur mit der Lufttemperatur die Wirkung der Hitze auf den Menschen nicht ausreichend beschrieben werden kann (MATZARAKIS und KOPPE 2016).

Im Laufe des Sommers stellt sich der menschliche Organismus besser auf hohe Lufttemperaturen ein, zum Beispiel durch Erhöhung der Schweißrate zur effizienteren Wärmeabgabe.

3.2 Hitze und stadtplanerische Aspekte

Hitze stellt eine generelle Herausforderung für Stadtplaner im Sommer dar. Im Zuge des Klimawandels gilt es, Hitze in der Stadt zu reduzieren. Menschen sind bestrebt, für sie angenehme Bedingungen aufzusuchen. Faktoren wie Schatten und Windbewegung, die Hitzestress vor allem im Sommer vermindern können, sind geeignete Mittel der Wahl. Die Qualität einer städtischen Umgebung wird nicht allein durch ansprechende Architektur, sondern auch durch die mikroklimatischen Bedingungen bestimmt. Eine große Bedeutung kommt hierbei dem thermischen Bioklima zu. Bietet ein Platz für Menschen angenehme thermische Bedingungen, halten sie sich dort gerne auf. Liegt dagegen thermischer Stress vor, wird der Aufenthalt als belastend und unangenehm empfunden. Das thermische Bioklima ist hierbei jedoch nicht nur als Frage des thermischen Komforts zu betrachten. Vielmehr wirkt es sich auch auf Arbeitseffizienz, Wohlbefinden und Gesundheit der ihm ausgesetzten Individuen aus (FRÖHLICH und MATZARAKIS 2011). Hitzestress sollte in der Stadtplanung, beispielsweise durch die verstärkte Schaffung von verschatteten Bereichen, eine hohe Bedeutung zukommen (MATZARAKIS 2013).

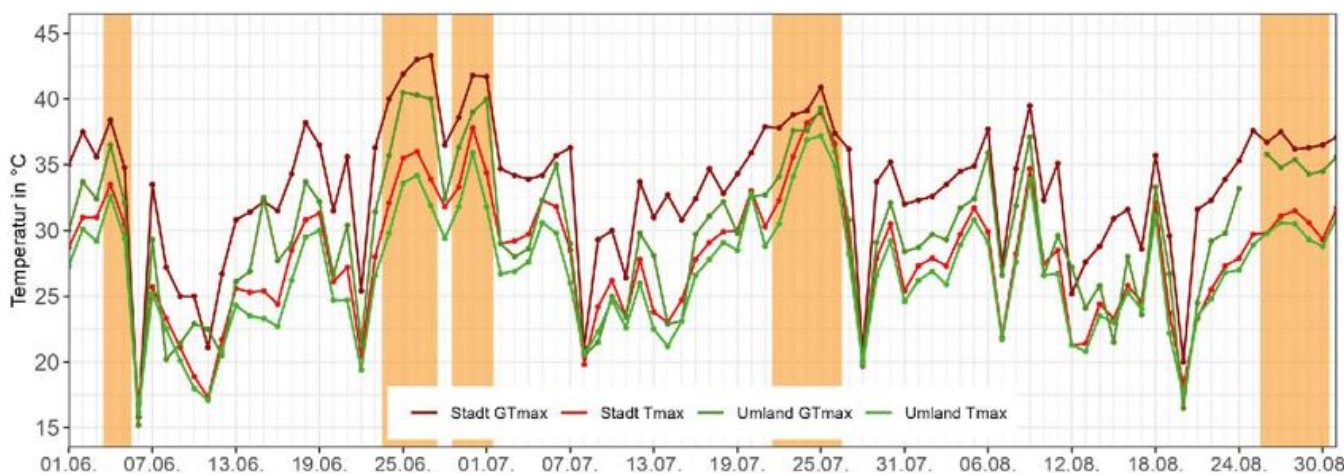


Abbildung 6-2: Maxima der Gefühlten Temperatur (GT_{max}) und der Lufttemperatur (T_{max}) in der Stadt Freiburg im Breisgau (Rottöne) und an der DWD-Flugplatzstation im Umland (Grüntöne) im Sommer 2019. Tage mit Hitzewarnungen des DWD sind orange hinterlegt.

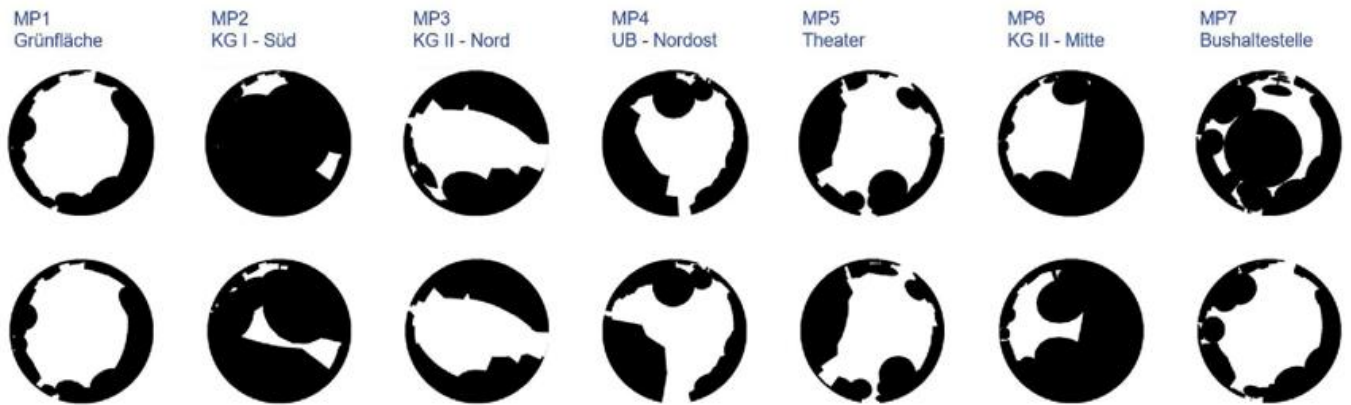


Abbildung 6-3: Sky View Factors (Himmelssichtfaktoren) für sieben verschiedene Messpunkte (MP) vor (oben) und nach (unten) den Veränderungen am „Platz der Alten Synagoge“ in Freiburg.



Abbildung 6-4: „Platz der alten Synagoge“ in Freiburg vor der Umgestaltung, die Ziffern stehen für den jeweiligen Messpunkt (Foto: Thomas Kunz).

Tabelle 6-3: Anzahl der Stunden pro Jahr mit Hitzestress (physiologisch äquivalente Temperatur, PET > 35 °C) vor der Umgestaltung (PET35) und nach der Umgestaltung (PET35a) für den jeweiligen Messpunkt (MP).

MP	PET35 in h	PET 35a in h	Δ in h
1	348,1	338,1	-10
2	196,2	207,2	11
3	322,4	329,1	6,7
4	302,6	273,5	-29,1
5	313,9	313,3	-0,6
6	275,9	218,1	-57,8
7	204,4	330,2	125,8

Am Beispiel des Platzes der Alten Synagoge in Freiburg und seiner Umgestaltung wird gezeigt, wie einfache stadtplanerische Veränderungen das Mikroklima modifizieren können. Bei der Umgestaltung dieser Fläche handelte es sich um eine Maßnahme von großem öffentlichem Interesse. Da der Planentwurf eine Änderung der Oberflächenbedeckung sowie veränderte Beschattungsverhältnisse vorsah, waren Unterschiede im thermischen Komfort zu

erwarten, insbesondere bei heißen Wetterlagen wie denjenigen im Sommer 2003. Die geplante Ausgestaltung des Platzes sah die vollständige Versiegelung vor. Durch den Umbau ergaben sich zum Beispiel Änderungen im Anteil des sichtbaren Himmels am oberen Halbraum (siehe Abb. 6-3). Diese haben sich über die mittlere Strahlungstemperatur auf die physiologisch äquivalente Temperatur manifestiert (Tabelle 6-3). Zwischen der thermischen Belastung vor und nach der Umgestaltung zeigen sich in den Ergebnissen der Berechnungen mit RayMan (MATZARAKIS et al. 2007, 2010) im direkten Vergleich der addierten absoluten Häufigkeiten der Belastungsklassen aller Messpunkte (dargestellt in Abb. 6-4) deutliche Unterschiede. Es ist zu erkennen, dass die Häufigkeiten von Klassen mit stärkerer thermischer Belastung zugenommen haben und Zeiten mit geringer thermischer Belastung oder thermisch komfortablen Bedingungen seltener geworden sind. Bei einer Erhöhung des Sky View Factor (SVF; Himmelssichtfaktor: Verhältnis von realer zur maximal möglichen Himmels-sicht) nimmt die Anzahl der jährlichen Stunden mit Hitzestress (PET > 35 °C) stark zu (siehe z. B. MP7). Der SVF stellt prinzipiell eine gute Möglichkeit dar, einen schnellen Überblick über die Veränderung von Strahlungsverhältnissen zu erlangen. Da diese jedoch durch eine Reihe anderer Faktoren, wie der direkten Sonneneinstrahlung, in weit größerem Ausmaß modifiziert werden können, sollte auf Grundlage des Sky View Factor als alleinigem Parameter keine Aussage über deren Veränderungen getroffen werden.

3.3 Hitzewarnsystem

Im Zuge des Klimawandels spielen Hitze und Hitzewellen eine außergewöhnlich große Rolle, weil Hitze jeden betrifft. Episoden mit ungewöhnlich hohen Lufttemperaturen und fehlender nächtlicher Abkühlung, die mehrere Tage andauern, werden oft als „Hitzewellen“ bezeichnet und können verschiedene Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung haben sowie zu einem Anstieg der Mortalität und Morbidität führen. Für den außergewöhnlich heißen Sommer 2003 gehen Schätzungen von einer starken Erhöhung der Mortalität in Mittel- und Westeuropa mit über 52.000 hitze-

bedingten Todesfällen aus. Qualitativ ist eine Hitzewelle durch eine andauernde Episode mit ungewöhnlicher Wärmebelastung gekennzeichnet, während die nächtliche Abkühlung nur unzureichend ist (MATZARAKIS et al. 2020b).

Zur Einschätzung der Auswirkungen einer Hitzewelle auf die menschliche Gesundheit sind neben deren Dauer auch die Belastungen durch Hitze in Innenräumen relevant (KRIESTEN et al. 2023). Dabei kann es durch die Gebäudecharakteristika und das Nutzerverhalten (z. B. Öffnen von Fenstern) zu einer starken Modifikation der Bedingungen im Innenraum kommen. Da die thermischen Gebäudeeigenschaften sehr heterogen sind, ist eine Individualisierung der Bewertung der thermischen Belastung sinnvoll. Weiterhin spielen der Einfluss des Stadtklimas (z. B. Wärmeinsel, Belüftung, Luftqualität) und die räumliche Verteilung der Hitzebelastung eine wichtige Rolle. Für ein Hitzewarnsystem ist es nicht ausreichend, Hitzewellen nur vorherzusagen. Es sollten auch Mechanismen festgelegt sein, die Interventionsmaßnahmen auslösen und in einfacher und verständlicher Form die Bevölkerung erreichen. Die einzelnen Faktoren des DWD-Hitzewarnsystems sowie die Kommunikationswege sind in Abbildung 6-5 dargestellt und werden nachfolgend beschrieben (MATZARAKIS et al. 2020a).

Um die saisonale Akklimatisation berücksichtigen zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, den Schwellenwert für die beginnende Wärmebelastung in Abhängigkeit von den thermischen Verhältnissen der zurückliegenden 30 Tage anzupassen, indem die Schwellenwerte für die thermischen Belastungsklassen verschoben werden. Die Schwellenwerte für die einzelnen Belastungsklassen unterscheiden sich somit von Region zu Region, wenn in den letzten 30 Tagen unterschiedliche Witterungsbedingungen geherrscht haben. So sind sie im Sommer im Südwesten Deutschlands in der Regel höher als im Norden.

Zur Bewertung der nächtlichen Situation wird ein Gebäudesimulationsmodell eingesetzt, das die Innenraumbedingungen berechnen kann und bei der Entscheidung über die Herausgabe einer Hitzewarnung berücksichtigt wird (MATZARAKIS et al. 2020b).

Der DWD warnt täglich von Mai bis Ende August für den aktuellen Tag und den Folgetag, wenn die Gefühlte Temperatur um 12:00 UTC die entsprechenden Warnschwellen überschreitet. Basierend auf der numerischen Wettervorhersage für die nächsten zwei Tage wird berechnet, ob und bis zu welcher Höhenlage im jeweiligen Landkreis die Hitzewarnschwelle „starke Wärmebelastung“ überschritten wird. Gleichzeitig wird auch überprüft, ob die nächtliche Innenraumtemperatur für ausgewählte, beziehungsweise repräsentative Altenheime unter einen bestimmten Schwellenwert fällt, da bei entsprechender nächtlicher Abkühlung eine Erholungsphase gewährleistet ist. Während lang andauernder Hitzewellen kann es durch die Anpassung der Schwellenwerte an die Witterungsbedingungen der vergangenen Wochen vorkommen, dass der Schwellenwert für eine „starke Wärmebelastung“ sehr hoch liegt. Um sicherzustellen, dass während solcher – für die Gesundheit durch die langanhaltende Belastung auch gefährlicher – Situationen gewarnt wird, wurde die maximale Höhe der Warnschwelle auf 34 °C Gefühlte Temperatur festgelegt. Bei einer gefühlten Temperatur von 38 °C und höher wird ohne Berücksichtigung der Nachtsituation automatisch gewarnt. Daraus ergibt sich ein Warnvorschlag, der durch Biometeorologinnen und -meteorologen überarbeitet wird. Diese haben sowohl die Möglichkeit, Warnungen aus dem Warnvorschlag herauszunehmen, als auch Warnungen hinzuzufügen, wenn ihrer Einschätzung nach eine thermisch kritische Situation eintreten könnte. Neben den vom Wärmebelastungsmodell bereitgestellten Daten beziehen die Biometeorologen auch Informationen aus einem Gebäudesimulationsmodell, das Auskunft über die thermische Belastung in Innenräumen gibt, in ihre Entscheidung mit ein.

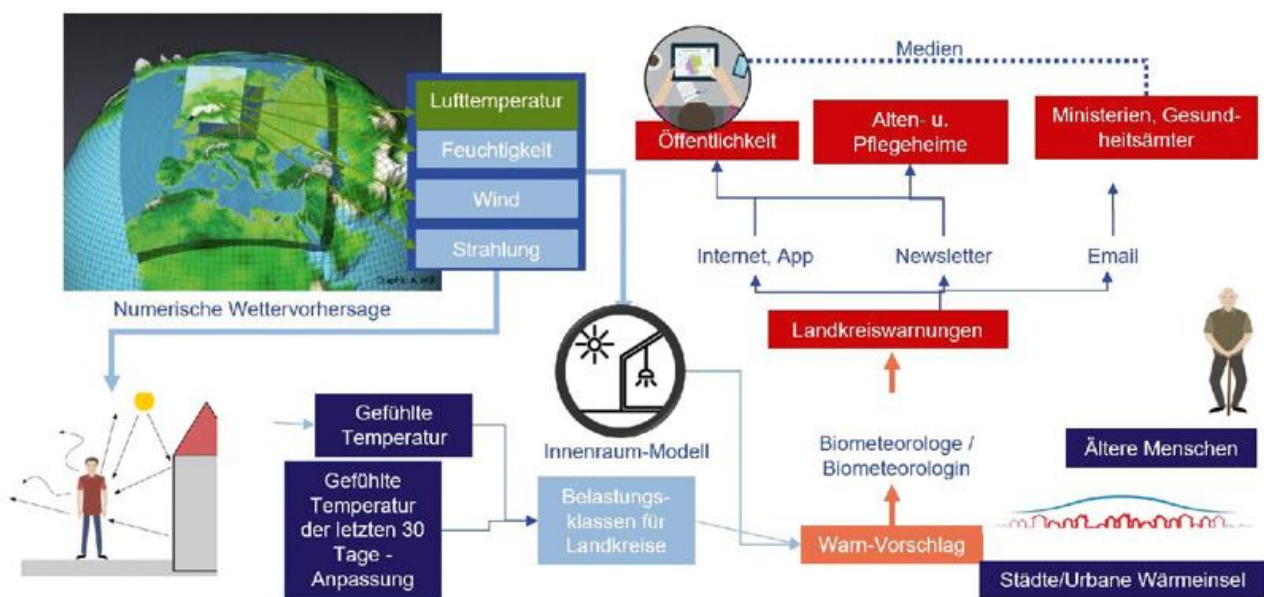


Abbildung 6-5: Flussdiagramm des DWD-Hitzewarnsystems und Kommunikationswege (nach MATZARAKIS et al. 2020a).



Abbildung 6-6: Kernelemente von Hitzeaktionsplänen (nach STRAFF et al. 2017).

Die Warnungen stehen auf Landkreisebene zur Verfügung und berücksichtigen verschiedene Höhenstufen in 200 m-Schritten und die jeweilige Topographie. Für Städte mit einer Bevölkerung von über 200.000 wird zusätzlich ein Modell zur Bestimmung der urbanen Wärmeinsel verwendet, um die nächtliche Situation besser bestimmen zu können und um eine adäquatere Beschreibung der Situation zu bekommen (MATZARAKIS et al. 2020b).

Das deutsche Hitzewarnsystem richtet sich insbesondere an Alten- und Pflegeheime, aber auch an die Allgemeinbevölkerung. In Deutschland werden aktuelle Hitzewarnungen über ein Newsletter-System, das Internet oder via Smartphone-App verbreitet. Aufgrund der fehlenden einheitlichen Definition von „Hitzewelle“ und der unterschiedlichen Zielgruppen der Warnungen unterscheiden sich auch die Kriterien für Hitzewarnungen von Land zu Land. Ist eine Hitzewarnung herausgegeben, werden von den zuständigen Gesundheitsbehörden der Bundesländer Interventionsmaßnahmen eingeleitet. Darüber hinaus haben sie die Möglichkeit, die Warnung weiter über Radio und Fernsehen an die Bevölkerung zu verbreiten (www.dwd.de/gesundheit).

4 Diskussion

4.1 Gesundheitliche Gefahren

Die Untersuchung von Hitzewellen bestätigt die Wirkung von ungünstigen thermischen Bedingungen auf die Ge-

sundheit. Länger andauernde Phasen von Hitzebelastung führen in besonderem Ausmaß zu signifikanten Erhöhungen der Mortalitätsrate. Die Auswertung von Klimasimulationen zeigt, dass Hitzewellen in einem zukünftigen Klima voraussichtlich signifikant häufiger auftreten und eine längere Dauer sowie größere Intensität aufweisen werden. So wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein Anstieg von Hitzewellen erwartet, der insbesondere auch Städte betrifft. Zusätzlich wird projiziert, dass die mittlere Dauer von Hitzewellen zunehmen wird (ZACHARIAS und KOPPE 2015, SCHLEGEL et al. 2021).

4.2 Hitzeaktionspläne

Als Prävention für gesundheitliche Folgen des Klimawandels dienen Hitzeaktionspläne, die umfassende Interventionsmaßnahmen zum Gesundheitsschutz bezwecken. Sie verfolgen einen integrativen Ansatz, der kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen zum Gesundheitsschutz in einem gemeinsamen Rahmen vereint und acht Handlungsfelder umfasst (Abb. 6-6; STRAFF et al. 2017, MATZARAKIS und ZIELO 2017).

Die Empfehlungen der Bund/Länder Ad-hoc Arbeitsgruppe „Gesundheitliche Anpassung an die Folgen des Klimawandels“ (STRAFF et al. 2017) sollen Hilfestellung bei der Erstellung derartig angepasster Hitzeaktionspläne geben. Zusätzlich zu diesen Handlungsempfehlungen dienen Anregungen aus der Praxis. Die Handlungsempfehlungen umfassen kurzfristig umsetzbare Aktivitäten (z. B. Einrichten von Kommunikationswegen; Handlungsfeld III in Abb. 6-6)

und längerfristig umsetzbare Tätigkeiten (z. B. stadtplanerische Maßnahmen, Handlungsfeld VII). Während in einigen Fällen die Implementierung schon weit fortgeschritten ist (z. B. Etablierung des Hitzewarnsystems, Handlungsfeld II), geben andere Aktivitäten noch Raum für Entwicklung und stellen vor allem eine Herausforderung für die Zukunft dar (z. B. Einrichtung eines zeitnahen Monitorings, Handlungsfeld VIII).

Die zuständige Behörde soll mit diesen Empfehlungen ermutigt werden, selbst bei geringen personellen und finanziellen Ressourcen, die Entwicklung eines Hitzeaktionsplans mit den verfügbaren Mitteln voranzubringen, um für den nächsten Hitzesommer besser gerüstet zu sein. Viele der Maßnahmen können kostengünstig umgesetzt werden, da es im Wesentlichen um die Bewusstseins-schärfung für diese Thematik geht, um hierdurch Änderungen von Verhaltensweisen bei den Betroffenen zu bewirken. Auch bauliche Maßnahmen können mitunter mit relativ geringem Aufwand durchgeführt werden, beispielsweise bei ohnehin notwendigen Änderungen an bestehenden Bauten, bei Stadtplanungen oder bei Bauvorhaben.

Wichtig hierfür ist der Konsens aller Beteiligten: Das Ziel ist, die Gesundheit der Bevölkerung vor den negativen Folgen extremer Hitze zu schützen. Hitzeaktionspläne sind von den Ländern beziehungsweise Kommunen individuell zu erstellen, da jeweils die örtlichen Gegebenheiten und hier insbesondere die klimatischen Bedingungen die Basis für die Entwicklung und Umsetzung geeigneter und sinnvoller Maßnahmen darstellen.

Die Methoden, Mittel und Anwendungen sind eindeutig und in den Hitzeaktionsplänen wiederzufinden. Sie sind nicht nur im Hitzewarnsystem (II), sowie Innenraumbedingungen (IV) und Stadtplanung (VII) enthalten, sondern bieten auch die Möglichkeit meteorologisches beziehungsweise human-biometeorologisches Wissen in die anderen Schulungen und Weiterbildungen einfließen zu lassen.

5 Schlussfolgerungen

Das Auftreten von Hitzewellen in den letzten Jahrzehnten hat gezeigt, dass es zu einer Erhöhung der Mortalität kommen kann. Die negativen Implikationen der sehr starken Hitzewellen im Jahr 2003 haben den akuten Handlungsbedarf deutlich gemacht. Um die Bevölkerung und spezifische Bevölkerungsgruppen zu schützen, wurde beim Deutschen Wetterdienst ein Hitzewarnsystem entwickelt und in die Routinevorhersage integriert. Die Warnungen basieren für die Tagsituation auf der gefühlten Temperatur und für die Nachtsituation auf einer berechneten Temperatur für Innenräume. Zusätzlich wird auch die Anzahl der Tage mit Hitzewarnung angegeben, wobei ältere Menschen und Städte in den Hitzewarnungen besonders berücksichtigt werden, weil ein großer Teil der Bevölkerung und auch Risiko- und vulnerable Bevölkerungsgruppen in Städten leben. Die Informationen können direkt über Newsletter

oder das Internet abgerufen werden. Die Warnungen des Hitzewarnsystems führen dazu, dass sich die Menschen, insbesondere bestimmte Bevölkerungsgruppen (unter anderem Altenheime, Pflegedienste und Rettungsdienste) besser auf Hitzebelastungen und Hitzeimplikationen vorbereiten und entsprechend reagieren können.

Städte benötigen grundsätzlich Maßnahmen für den Klimaschutz, aber auch zur Sicherung von Lebensqualität und Wohlbefinden der Stadtbewohner, die rasch angegangen werden müssen. Dazu sind quantitative Aussagen über Häufigkeit und Intensität von für Menschen thermisch belastende Situationen erforderlich. Diese sollten sinnvollerweise auf der Grundlage thermischer Indizes (z. B. gefühlte Temperatur) beruhen, die das thermische Befinden des Menschen anhand seiner Energiebilanz bewerten. Messungen und Modellierungen von jetzigen und zukünftigen klimatischen Verhältnissen zeigen, dass in Städten mit gemäßigttem Klima ein großes Adaptationspotenzial besteht, das mittels stadtplanerischer Maßnahmen, wie die Umwandlung urbaner versiegelter Areale in nicht versiegelte bewachsene Flächen, leicht umgesetzt werden kann.

Literatur

- ASHRAE, 2013: ASHRAE Handbook – Fundamentals. Chapter 9: Thermal Comfort. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Hrsg.), Atlanta.
- FANGER, P.O., 1972: Thermal comfort. McGraw-Hill Book Co., New York.
- FRÖHLICH, D., MATZARAKIS, A., 2011: Hitzestress und Stadtplanung – Am Beispiel des „Platz der alten Synagoge“ in Freiburg im Breisgau. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **71**, 333-338.
- ISO, 2004a: ISO 7933:2004-08 – Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung (Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain). *Beuth Verlag*, Berlin, 34 S.
- ISO, 2004b: ISO 9886:2004-02 – Ergonomie – Ermittlung der thermischen Beanspruchung durch physiologische Messungen (Ergonomics – Evaluation of thermal strain by physiological measurements). *Beuth Verlag*, Berlin, 21 S.
- IUPS, 2003: Glossary of terms for thermal physiology. 3rd ed. revised by The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences (IUPS Thermal Commission). *Journal of Thermal Biology* **28**, 75-106.
- JENDRITZKY, G., 1990: Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen – Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell. *Beitr. Akademie f. Raumforschung u. Landesplanung* **114**, 7-69.

- KRIESTEN, T.F., ZIEMANN, A., SCHÜNEMANN, C., GOLDBERG, V., MODEROW, U., ORTLEPP, R., 2023: Meteorologische Daten zur Bewertung der Wärmebelastung in Gebäuden. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 71-77.
- KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.
- MATZARAKIS, A., 2013: Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **73**, 115-118.
- MATZARAKIS, A., 2020: Perspektiven der Umwelt- und Biometeorologie. In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U., REUBER P., VÖTT, A. (Hrsg.). *Geographie: Physische Geographie und Humangeographie, Springer Spektrum*, 289-291.
- MATZARAKIS, A., KOPPE, C., 2016: Hitzewellen – eine zunehmende Gesundheitsgefahr. *Internistische Praxis* **56**, 585-592.
- MATZARAKIS, A., LASCHEWSKI, G., MUTHERS, S., 2020a: The Heat Health Warning System in Germany – Application and Warnings for 2005 to 2019. *Atmosphere* **11**, 170, 1-13, doi: 10.3390/atmos11020170.
- MATZARAKIS, A., MUTHERS, S., GRAW, K., 2020b: Thermische Belastungen von Bewohnern in Städten bei Hitzewellen am Beispiel von Freiburg (Breisgau). *Bundesgesundheitsblatt* **63**, 1004-1012, doi: 10.1007/s00103-020-03181-0.
- MATZARAKIS, A., RUTZ, F., MAYER, H., 2007: Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* **51**, 323-334.
- MATZARAKIS, A., RUTZ, F., MAYER, H., 2010: Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* **54**, 131-139.
- MATZARAKIS, A., ZIELO, B., 2017: Maßnahmen zur Reduzierung von Hitzebelastungen für Menschen – Bedeutung von Hitzeaktionsplänen. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **77**, 316-320.
- PARSONS, K.C., 2014: Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. 3. Ausgabe. *Taylor & Francis*, London.
- SCHLEGEL, I., MUTHERS, S., MATZARAKIS, A., 2021: Einfluss des Klimawandels auf die Morbidität und Mortalität von Atemwegserkrankungen. *Umwelt und Gesundheit* **04/2021**.
- STAIGER, H., BUCHER, K., JENDRITZKY, G., 1997: Gefühlte Temperatur – Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien mit der Maßzahl Grad Celsius. In: 3. Fachtagung BIOMET, 4.-5. Dezember 1996 in München. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *Annalen der Meteorologie* **33**, 100-107.
- STAIGER, H., LASCHEWSKI, G., GRÄTZ, A., 2012: The Perceived Temperature – A versatile index for the assessment of the human thermal environment Part A: Scientific Basics. *International Journal of Biometeorology* **56**, 165-176.
- STRAFF, W., MÜCKE, H.-G., BAEKER, R., BALDERMANN, C., BRAUBACH, A., LITVINOVITCH, J., MATZARAKIS, A., PETZOLD, G., REXROTH, U., 2017: Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Bund/Länder Ad-hoc Arbeitsgruppe Gesundheitliche Anpassung an die Folgen des Klimawandels (GAK). *Bundesgesundheitsblatt* **60**, 662-672, doi: 10.1007/s00103-017-2554-5.
- VDI, 2022: VDI 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. *Beuth Verlag*, Berlin, 80 S.
- ZACHARIAS, S., KOPPE, C., 2015: Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland. *Umwelt und Gesundheit* **06/2015**.

Kontakt

PROF. DR. ANDREAS MATZARAKIS
Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung
Deutscher Wetterdienst
Stefan-Meier-Str. 4
79104 Freiburg
andreas.matzarakis@dwd.de

T. F. KRIESTEN, A. ZIEMANN, C. SCHÜNEMANN, V. GOLDBERG, U. MODEROW,
R. ORTLEPP

7 Meteorologische Daten zur Bewertung der Wärmebelastung in Gebäuden

Meteorological data to assess heat stress in buildings

Zusammenfassung

Thermische Gebäudesimulationen eignen sich zur objektiven Bewertung der Wärmebelastung in Gebäuden. Die Einschätzung der Hitzeroberstheit über Gebäudesimulationen hängt jedoch sehr stark vom verwendeten meteorologischen Datensatz ab. Für diesen kommen verschiedene Datenquellen infrage. Üblicherweise werden für Gebäudesimulationen Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes gewählt, die sowohl für die Gegenwart als auch für Zukunftsszenarien vorliegen. Ein weiterer Ansatz ist die Nutzung von meteorologischen Messdaten, die jedoch nicht überall zur Verfügung stehen. Um mikroskalige Effekte zu berücksichtigen, können Stadtklimasimulationen mit horizontaler Auflösung von wenigen Metern durchgeführt werden und als Eingangsgrößen für Gebäudesimulationen dienen. In diesem Artikel wird ein Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten des meteorologischen Inputs und den daraus folgenden starken Abweichungen bei der Beurteilung der thermischen Belastung im Gebäude gegeben. Dabei wird aufgezeigt, dass zur Generierung valider meteorologischer Daten für die Evaluierung der Wärmebelastung in Innenräumen noch deutlicher Forschungsbedarf besteht.

Summary

Thermal building simulations are suitable for an objective evaluation of the heat stress in buildings. However, the assessment of heat resistance using building simulations depends strongly on the meteorological dataset used, for which various sources can be considered. In general, test reference years from the German Meteorological Service are used. They exist for present and future scenarios. Another approach is the use of meteorological measurement data, which, however, is not available everywhere. To consider microscale effects, urban climate simulations can be performed. They have a horizontal resolution of a few meters and can serve as input for thermal building simulations. In this contribution, we give an overview of various common meteorological inputs and the resulting strong deviations in the simulation outcomes. We show that there is still a clear need for research to generate valid meteorological data for the evaluation of indoor heat stress.

1 Einführung

Der immer schneller und stärker fortschreitende Klimawandel bringt neben höheren durchschnittlichen Temperaturen auch häufigere und extremere Wetterereignisse mit sich, was nicht nur zu stärkeren Wärmebelastungen im Freiraum, sondern auch in Gebäuden führt. Dies beeinträchtigt Menschen in ihrer Leistungsfähigkeit, ihrem Wohlbefinden und führt zu drastischen gesundheitlichen Folgen wie steigenden Mortalitätsraten während Hitzeperioden (z. B. AN DER HEIDEN et al. 2019, MATZARAKIS 2023). Dementsprechend besteht die Notwendigkeit, die Wärmebelastung in Innenräumen sowie die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen zuverlässig zu be-

werten. Eine Anpassung kann durch Nutzung von Klimaanlagen geschehen, was jedoch einen hohen Energieverbrauch und weitere damit verbundene Emissionen mit sich bringt und gleichzeitig den städtischen Wärmeinseleffekt (*Urban Heat Island Effect*, UHI-Effekt; KUTTLER und GROSS 2023, SCHERER 2023) verstärkt (SALAMANCA et al. 2014), weshalb eine derartige Maßnahme im Allgemeinen nur die letzte Wahl darstellen sollte. Stattdessen ist es wichtig, Gebäude bereits im Planungs- und Sanierungsprozess möglichst hitzeresistent zu gestalten. Hierfür sind eine genaue Bewertung der Wärmebelastung einzelner Räume und die Untersuchung von geeigneten Anpassungsmaßnahmen mithilfe thermischer Gebäudesimulationen unabdingbar.

2 Thermische Gebäudesimulationen und Bewertung der Wärmebelastung in Innenräumen

Zur genauen Analyse der Wärmebelastung in Gebäuden eignen sich thermische Gebäudesimulationen. Im Unterschied zu Innenraummessungen ermöglichen sie die vergleichende Bewertung der baulichen Hitzeroberheit von Gebäuden und Räumen untereinander, da das Nutzerverhalten standardisiert werden kann. Weiterhin können Gebäudesimulationen auch der Verallgemeinerbarkeit und Übertragbarkeit von Messergebnissen dienen oder durch Variation einzelner Randbedingungen zur Untersuchung des Einflusses einzelner Größen genutzt werden. Dementsprechend spielt die Wahl der Randbedingungen eine entscheidende Rolle. Diese umfassen zum einen das Gebäudemodell (Geometrie, Konstruktion, Nutzerverhalten, interne Wärmelasten) und zum anderen die antreibenden meteorologischen Daten (Temperatur, relative Feuchte, direkte und diffuse Solarstrahlung, Windrichtung- und Geschwindigkeit, Bewölkung). Letztere können sich in ihren Datenquellen und der Methodik zur Erstellung des Datensatzes grundlegend unterscheiden (siehe Abschnitt 3.1) und zu stark unterschiedlichen Simulationsergebnissen führen (siehe Abschnitt 4). Als Ergebnisgrößen durchgeführter Gebäudesimulationen werden raumweise Raumlufttemperatur, operative Temperatur und relative Feuchte ausgegeben. Die operative Temperatur ist in der DIN 4108-2 (DIN 2013) definiert und berücksichtigt neben der Raumlufttemperatur den Strahlungseinfluss in Form „der flächenanteilig gemittelten Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen“. Die Bewertung der Wärmebelastung kann anhand dieser Größen über die Berechnung von Übertemperaturgradstunden (ÜTG) mit der Einheit Kelvinstunden, wie sie in der DIN 4108-2 definiert werden, erfolgen. Hierbei werden die Differenzen zwischen operativer Temperatur und einer konstanten Grenztemperatur stündlich berechnet und über das simulierte Jahr aufsummiert.

3 Auswahl meteorologischer Datensätze für thermische Gebäudesimulationen

3.1 Synthetische Testreferenzjahre

Bereits seit 1986 werden sogenannte Testreferenzjahre (*Test Reference Years*, TRY) vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Analyse des thermischen Verhaltens von Gebäuden sowie der Auslegung von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen bereitgestellt (DWD und BBR 2011, 2017). In den 2011 herausgegebenen TRY existieren Datensätze für gegenwärtige und zukünftige sowie mittlere und extreme Jahre für 15 verschiedene Klimaregionen in Deutschland. Abgesehen von den gegenwärtigen extremen TRY handelt es sich bei allen anderen um synthetisch zusammengesetzte Daten. Die Zusammensetzung der synthetischen TRY erfolgt durch Segmente aus realen charakteristischen Witterungsabschnitten des Zeitraumes 1993–2007. Die Segmente werden dabei anhand monatlicher und jahreszeitlicher Mittelwerte und Streuung der Lufttemperatur,

bezogen auf Vergleichszeiträume ausgewählt. Die einzelnen Segmente sind dabei tagestreu. Die Berücksichtigung des städtischen Wärmeinseleffektes ist in diesen TRY nicht direkt enthalten, kann allerdings über ein Programmmodul, welches den UHI-Effekt über Einwohnerzahl, Windgeschwindigkeit, Bedeckungsgrad und Tageszeit berücksichtigt (WIENERT et al. 2013), aufgeprägt werden. Die mittleren gegenwärtigen TRY aus dem Jahr 2011 sind aktuell in der DIN 4108-2 zur Nachweisführung des sommerlichen Wärmeschutzes vorgeschrieben, allerdings ohne Berücksichtigung des UHI-Programmmoduls. Dies ermöglicht eine einfache und übersichtliche Auswahl an Datensätzen. Allerdings ist die geringe Regionalisierung, die Vernachlässigung der Strahlungsgrößen bei der Segmentauswahl, die Nicht-Berücksichtigung des UHI-Effektes sowie extremer und zukünftiger Klimata in der Norm diskutabel.

Inzwischen existieren neue „ortsgenaue Testreferenzjahre“, die 2017 vom DWD veröffentlicht wurden. Sie liegen in einer räumlichen Auflösung von 1 km² vor und basieren auf dem in KRÄHENMANN et al. (2018) entwickelten Gitterdatensatz für den Zeitraum von 1995 bis 2012. Für den Gitterdatensatz wurden je nach meteorologischen Variablen verschiedene Datenquellen kombiniert. Diese umfassen Stationsdaten, Satellitenbeobachtung und Daten aus regionalen Klimamodellen. Die einzelnen Variablen wurden nach unterschiedlichen Verfahren interpoliert. Die Bestimmung der zukünftigen TRY basiert auf einer Kombination der Szenarien RCP4.5 und RCP8.5. Neben der Höhenabhängigkeit in den Temperatur- und Feuchtegrößen ist der Stadteffekt direkt nach WIENERT et al. (2013) berücksichtigt. Allerdings wird hier unter Betrachtung von CORINE-Landnutzungsklassen (KEIL et al. 2011) eine fiktive Bevölkerungszahl berechnet und zur Bestimmung eines maximalen UHI-Effektes (UHI_{max}) herangezogen. Im Vergleich zu den Testreferenzjahren aus dem Jahr 2011 wird bei der Erstellung der mittleren gegenwärtigen ortsgenaue TRY zur Segmentauswahl zusätzlich die Globalstrahlung mit einbezogen.

3.2 Synthetische Zeitreihen zur Kühllastberechnung

Während die Nutzung von Testreferenzjahren in Gebäudesimulationen dazu dienen kann, die Wärmebelastung für den gesamten Sommer zu bewerten, gibt es den Ansatz der synthetisch erstellten Zeitreihen zur raumweisen Bestimmung von Kühllasten und Auslegung von Anlagentechnik zur Raumkühlung. Der bekannteste Ansatz ist hier die sogenannte *Cooling Design Period* (CDP) der VDI-Richtlinie 2078 (VDI 2015) zur Bestimmung von Kühllasten, vorwiegend von Nicht-Wohngebäuden. Diese besteht aus einer 14-tägigen Vorberechnungsphase mit Sommertagen mittleren Bedeckungsgrades, einer darauffolgenden vier-tägigen Anlaufphase mit klaren Sommertagen und einer ansteigenden Lufttemperatur sowie dem *Cooling Design Day* (CDD), einem klaren Sommertag mit maximaler Außenlufttemperatur (Abb. 7-1). Die höchste Raumtemperatur bzw. größte Kühllast tritt somit am CDD auf. Die

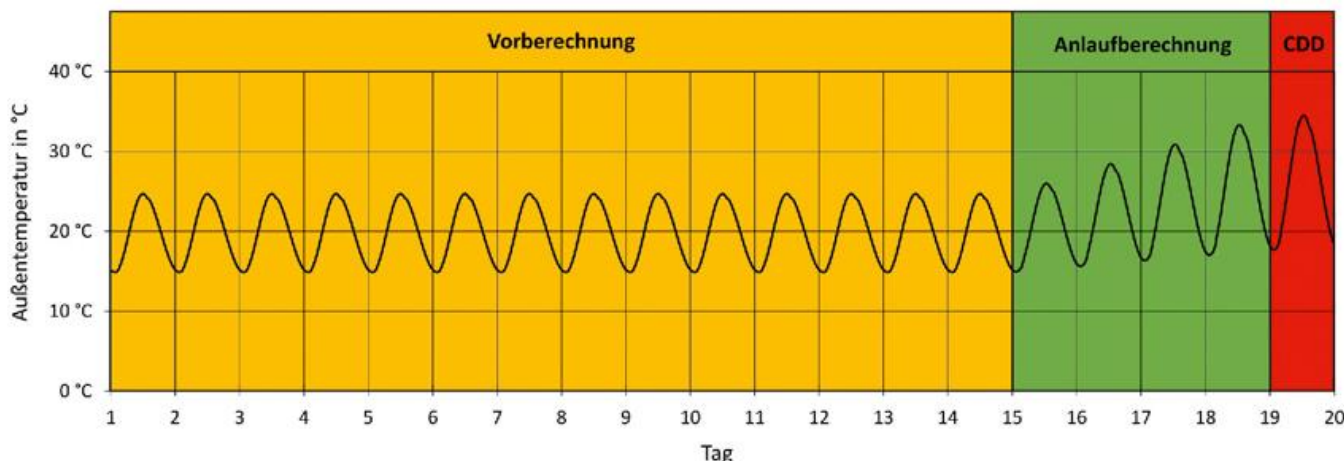


Abbildung 7-1: Schematischer Aufbau einer synthetischen Zeitreihe der *Cooling Design Period* aus der VDI-Richtlinie 2078 (VDI 2015) zur Bestimmung der Kühllast (in Anlehnung an VDI 2015, Änderungsblatt zur Ausgabe Juni 2015).

Zeitreihe enthält dabei eine gewisse Regionalisierung (Zuweisung des Gebäudestandortes zu vier Kühllastzonen, angelehnt an DIN 2003), eine vereinfachte Aufprägung eines Stadteffektes („Großstadtkorrektur“ durch Erhöhung des Tagesmaximums der Außentemperatur um 1 K für einige Kühllastzonen) sowie eine Korrektur für die Höhenlage des Gebäudestandortes größer 650 m NN. Diese Zeitreihe ist somit standortbezogen und muss für jeden Sommermonat (April bis einschließlich September) separat erstellt und die Kühllast durch Gebäudesimulationen monatsweise ermittelt werden. Für Gebäude ohne Anlagentechnik zur Raumkühlung schlägt die VDI 2078 die Bewertung der Wärmebelastung des Gebäudes unter Nutzung der regionalisierten TRY aus dem Jahr 2011 oder zum Teil TRY 1985 des DWD oder von METEONORM (Version 6.1.0.20) vor. Dabei erfolgt die Zuweisung von Städten zu Referenzstationen der TRY in einer separaten Tabelle. Für die Bewertung der Wärmebelastung ungekühlter Räume gibt die VDI 2078 die Auswertung von Übertemperaturen unter Nutzung der TRY (Simulation des gesamten Sommers) und Maximaltemperaturen (am CDD) vor.

3.3 Meteorologische Messdaten

Einen weiteren möglichen Dateninput stellt die Verwendung meteorologischer Messdaten dar. Diese besitzen den Vorteil, real aufgetretene Wettersituationen zu berücksichtigen und damit realistische Wärmebelastungen abbilden oder Simulationen unter Einbeziehung von Innenraummessungen kalibrieren zu können (SCHÜNEMANN et al. 2021). Gleichzeitig ist die Anwendung durch die vorhandene Dichte an Messstationen mit einheitlichen Qualitätskriterien beschränkt und eine umfassende Aufbereitung der Messdaten in der Regel notwendig. Je nach Verwendungszweck können aus den Messdaten charakteristische mittlere oder extreme Jahre bezüglich des Sommer- oder Winterhalbjahres bestimmt werden. Im Folgenden wird eine Methodik zur Bestimmung eines durchschnittlichen Sommers der Gegenwart sowie der Berücksichtigung des Stadteffektes erläutert.

3.3.1 Methodik zur Bestimmung eines mittleren Sommers der Gegenwart

Bei dem hier vorgestellten, im *HeatResilientCity*-Projekt (HRC 2023) entwickelten Ansatz zur Bestimmung eines durchschnittlichen Sommers der Gegenwart werden meteorologische Messdaten von Wetterstationen des DWD im Zeitraum 1991–2020 aufbereitet, sodass für jedes Jahr charakteristische Kenngrößen bestimmt werden können. Die Kenngrößen werden im Zeitraum der Sommermonate (Juni bis August) berechnet und umfassen die Wärmesumme, die Summe der direkten Solarstrahlung, die Anzahl heißer Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) und warmer Nächte ($T_{min,Nacht} \geq 18 \text{ °C}$) sowie die Anzahl und Andauer von Hitzewellen, wobei für letztere die Definition des DWD verwendet wird (DWD 2023). Für den betrachteten Zeitraum wird ein mittlerer Bereich zwischen dem 25. und 75. Perzentil für die jeweiligen Kenngrößen bestimmt. Durch gleichmäßige Erhöhung bzw. Verringerung der Perzentile liegen immer weniger Jahre im mittleren Bereich, bis zuletzt nur noch eines die Kriterien erfüllt und als das mittlere Jahr definiert wird. Dieses Vorgehen kann für Messdaten unterschiedlicher Wetterstationen angewendet werden, um standortbezogene mittlere Sommer unter gegenwärtigen Klimabedingungen zu bestimmen. Da robuste Anpassungsmaßnahmen die Betrachtung zukünftiger Bedingungen erfordern, wird im *HeatResilientCity*-Projekt derzeit auch an Methoden zur Abbildung zukünftiger Jahre auf Basis von Klimaprojektionen und Messdaten geforscht.

3.3.2 Methodik zur Aufprägung des Stadteffektes

Um wirksame und robuste Anpassungskonzepte für den sommerlichen Wärmeschutz von Gebäuden in Städten abzuleiten, müssen die meteorologischen Eingangsdaten auch den Stadteffekt beinhalten. Der urbane Wärmeineffekt beschreibt die bodennah erhöhte Lufttemperatur in Ballungsräumen im Vergleich zum ländlich geprägten Umland. Dieser Effekt ist insbesondere nachts ausgeprägt und erreicht maximale Werte während einer austauscharmen Wetterlage, welche durch eine geringe Bewölkung und

schwachen Wind gekennzeichnet sind. Bisherige Ansätze zur Berechnung des maximalen UHI-Effektes für den Zweck der Gebäudesimulationen (DWD und BBR 2011, 2017) beziehen sich auf die Stadtgröße bzw. die Einwohnerzahl (KUTTLER 1997, OKE 1973). Die Ergebnisse solcher Untersuchungen sind kritisch zu sehen, da sich die Stadtstrukturen als wesentliche Einflussgröße auf den UHI-Effekt auch bei ein und derselben Einwohnerzahl weltweit stark unterscheiden und auch andere Faktoren einen Einfluss auf den UHI-Effekt haben (KUTTLER 2012). DIRKSEN et al. (2019) stellten eine Möglichkeit vor, den UHI-Effekt mithilfe eines urbanen Strukturparameters auf eine Zeitreihe meteorologischer Daten einer ländlichen Wetterstation aufzuprägen. Der maximal mögliche UHI-Effekt (THEEUWES et al. 2017) wird anhand der gebäude- und vegetationsbezogenen Horizonteinschränkung (*Sky View Factor*, SVF) bestimmt. Die Tagesamplituden der Lufttemperatur, Solarstrahlung und Windgeschwindigkeit führen zu einer möglichen Verringerung des UHI-Effektes. Voraussetzung für diese Methode sind ein hochaufgelöstes (mindestens 2 m), digitales Objektmodell und raumbezogene Informationen zum urbanen Grün in der Stadt. Falls diese Daten noch nicht zur freien Verfügung stehen, kann alternativ der globale Datensatz der *Local Climate Zones* (LCZ; DEMUZERE et al. 2022, STEWART und OKE 2012) genutzt werden. Das System der LCZ besteht aus verschiedenen, jeweils einzigartigen Klassen, die durch einen Satz an Parameterwerten geprägt (z. B. SVF, bebaute Fläche, Aspekt-Verhältnis, Bodenversiegelung, Rauigkeit) sind. Aus Messungen und Modellsimulationen stehen Werte für den maximalen UHI-Effekt für 17 LCZ-Klassen bereit (ALEXANDER und MILLS 2014, LECONTE et al. 2015, STEWART und OKE 2012, STEWART et al. 2014). Der maximale UHI-Effekt in einem Stadtzentrum wird im HRC-Projekt aus dem Median der LCZ-Klassen in einem festgelegten Gebiet bestimmt. Eine Parametrisierung der tageszeitlichen Variabilität des UHI-Effektes wird aus Temperaturdaten der Stationen Berlin-Alexanderplatz (Stadt) und Berlin-Schönefeld (Flughafen BER, Umland) abgeleitet. Unter der Annahme, dass sich der absolute Wasserdampfgehalt der Luft im Mittel nur unwesentlich zwischen Stadt und Umland unterscheidet, wird mit der hervorgerufenen Temperaturerhöhung auch eine Veränderung der relativen Feuchte bedingt. Die Angaben zu den LCZ werden weiterhin benutzt, um die erhöhte Rauigkeit und damit eine verringerte mittlere Windgeschwindigkeit in urbanen Gebieten im Vergleich zum Umland abzuschätzen.

Schließlich werden die durch den Stadteffekt hervorgerufenen Änderungen auf die zuvor bestimmte meteorologische Zeitreihe (siehe Abschnitt 3.3.1) aufgeprägt, welche dann als Antrieb für die Gebäudesimulationen genutzt werden.

3.4 Mikroskalige Stadtklimasimulationen

Die bisher vorgestellten meteorologischen Ansätze sind mesoskaliger Natur oder behandeln die reale Stadtstruktur und ihre Wirkungen auf die meteorologischen Felder in parametrisierter, vereinfachter Form. Soll die Wirkung der mikroskaligen Stadtstruktur auf die Wärmebelastung eines Gebäudes analysiert werden, kann dies mit mikroskaligen Stadtklimasimulationen durchgeführt werden. Hierfür wird die dreidimensionale Stadtstruktur in numerischen Modellen wie ENVI-met (BRUSE und FLEER 1998, SIMON et al. 2018) oder PALM-4U (MARONGA et al. 2020) abgebildet und somit lokale Wärmeinseleffekte sowie Strömungseffekte in den Tagesgängen von meteorologischen Größen berücksichtigt. Werden die meteorologischen Zeitreihen vom Standort des Gebäudes in der thermischen Gebäudesimulation als Input genutzt, können in dieser Modellkette Auswirkungen lokaler Effekte im Freiraum auf die Wärmebelastung im Wohngebäude analysiert werden (Abb. 7-2). Dies wurde exemplarisch in SCHÜNEMANN et al. (2020, 2022) durchgeführt, um die Wirkung der lokalen Durchlüftung des Quartiers auf die Überhitzung zu prüfen. Die Limitierungen dieser hochaufgelösten Methode sind neben der geeigneten Wahl der Simulationsrandbedingungen (SCHÜNEMANN et al. 2022) der Aufwand zur Erstellung des dreidimensionalen Stadtmodells, die verfügbare (aktuelle und vollständige) Datengrundlage sowie die durch den hohen Rechenaufwand bedingte Begrenzung der Simulationszeit auf wenige Sommertage. Da diese Zeitperiode nicht ausreicht, um die thermischen Wärmespeicherungsprozesse von Gebäuden adäquat zu berücksichtigen, wird ein Ansatz in Analogie zur *Cooling Design Period* der VDI-Richtlinie 2078 (VDI 2015) verfolgt. Aus einem durchschnittlichen sommerlichen, bedeckten Tag wird eine konstante 14-tägige Einschwingphase generiert und aus einer kurzen Periode heißer, strahlungsreicher Sommertage eine 14-tägige Hitzeperiode mit ansteigenden Außenlufttemperaturwerten gebildet (SCHÜNEMANN et al. 2022). Durch diese 28-tägige Sommerperiode können Auswirkungen lokaler Stadtklimaeffekte sowie Anpassungsmaßnahmen im Freiraum (z. B. Anpflanzung von großkronigen Bäumen)

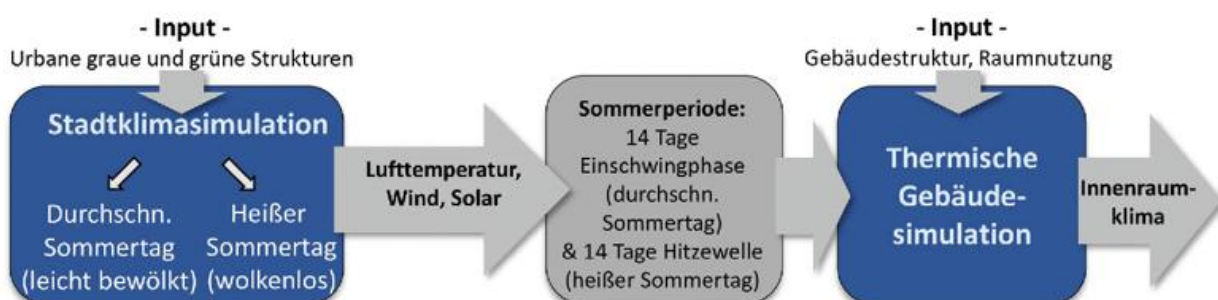


Abbildung 7-2: Schema der Modellkette Stadtklimasimulation-Gebäudesimulation.

auf die Wirkung der Wärmebelastung im Innenraum geprüft werden. Mit diesem Ansatz ist es jedoch nicht möglich, die Bewertung der Wärmebelastung über den kompletten Sommer vorzunehmen.

4 Ausgewählte Beispielsimulationen und Diskussion

Um die Auswirkung unterschiedlicher Datensätze auf die Wärmebelastung im Gebäude darzustellen, wurden Gebäudesimulationen mit der Software IDA ICE 4.8 (EQUA 2018) durchgeführt. Das Gebäudemodell eines gründerzeitlichen Mehrfamilienhauses in Blockrandbebauung bleibt dabei unverändert und orientiert sich in den Randbedingungen an SCHÜNEMANN et al. (2021). Die genutzten fünf meteorologischen Datensätze sind in Tabelle 7-1 aufgeführt. Bei TYP2016 handelt es sich um ein Jahr mit einem durchschnittlichen (gemessenen) Sommer für Dresden (siehe Abschnitt 3.3.1), TYP2016* beinhaltet für dieses Jahr den Stadteffekt (siehe Abschnitt 3.3.2). TRY2010 stellt das mittlere gegenwärtige TRY nach DIN 4108-2 (DIN 2013) für Dresden dar, die letzten beiden Datensätze entsprechen denen der durchschnittlichen gegenwärtigen (TRY2015) bzw. zukünftigen (TRY2045) ortsgenauen TRY für die Dresdener Innenstadt. Alle Datensätze repräsentieren in gewisser Weise durchschnittliche Sommer. Allerdings zeigen bereits die Kenngrößen in Tabelle 7-1, dass sich diese zum Teil deutlich unterscheiden.

Die Gebäudesimulationen wurden exemplarisch für ein Schlafzimmer im Dachgeschoss in Form von Übertemperaturgradstunden, bezogen auf eine Grenztemperatur von 27 °C ($\dot{U}T_{G,27}$), sowie für maximale Raumlufttemperaturen ($T_{\text{raum,max}}$) und operative Temperaturen ($T_{\text{op,max}}$) ausgewertet (Abb. 7-3). Allgemein ist festzuhalten, dass sich die Simulationsergebnisse in Abhängigkeit der antreibenden Datensätze stark unterscheiden und somit auch die Bewertung der Hitzeroberheit des Gebäudes. Insbesondere der Einfluss des Stadtklimas (vgl. z.B. TRY2016 und TYP2016*) führt zu deutlich stärkeren Wärmebelastungen und zeigt damit die Relevanz, diesen adäquat zu berücksichtigen. Auffällig ist zudem, dass nicht nur Datensätze mit den hohen Kennwerten in Außentemperatur, Wärmesumme oder Strahlung zu hohen $\dot{U}T_G$ führen. So weist die

Simulation mit TRY2045 die zweithöchsten $\dot{U}T_G$ und gleichzeitig eine hohe Anzahl warmer Nächte, die die Nachtauskühlung verschlechtern, auf. Derartige Zusammenhänge sind genauer zu untersuchen, um neben den klassischen Temperatur- und der Strahlungsgrößen weitere relevante Kenngrößen (Nachttemperaturen, Wind, Abstand zwischen Hitzewellen etc.) zu identifizieren und bei der Auswahl und Bewertung von Datensätzen einfließen zu lassen. In den Simulationen führt das TRY2010 ohne Stadteffekt und mit geringer räumlicher Auflösung zu annähernd gleichen $\dot{U}T_G$ wie das ortsgenaue und UHI-Effekt berücksichtigende TRY2015. Eine genauere Betrachtung dieser Beobachtung ist insbesondere für andere Standorte mit gleicher Klimaregion bzw. in (Klima-)Grenzregionen von Interesse.

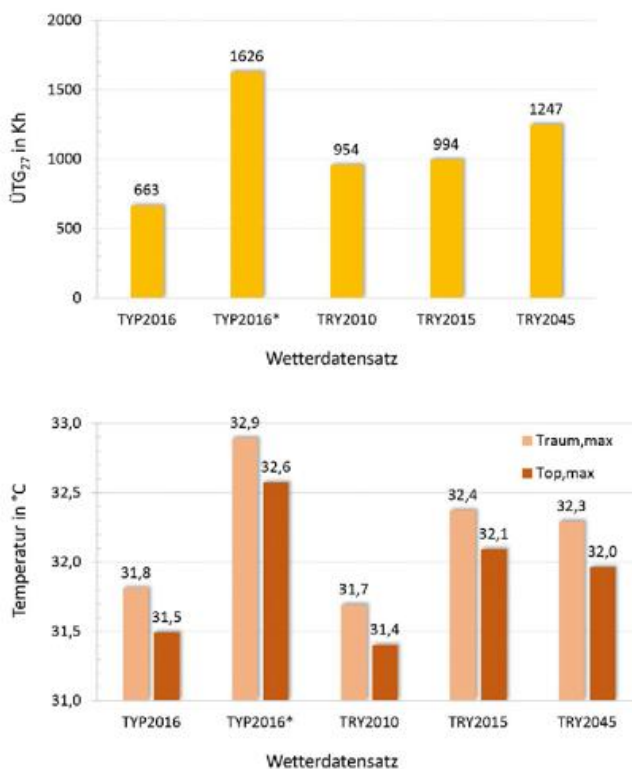


Abbildung 7-3: Übertemperaturgradstunden (oben) sowie maximale Raumlufttemperatur und operative Temperatur (unten) für ein Schlafzimmer im Dachgeschoss in Abhängigkeit vom verwendeten Wetterdatensatz.

Tabelle 7-1: Durchschnittstemperatur T_o , Wärmesumme, maximale Temperatur T_{max} , Anzahl heißer Tage und warmer Nächte sowie Summe der Globalstrahlung in den Monaten Juni bis August für verschiedene Datensätze.

Jahr	T_o in °C	Wärmesumme in Kh	T_{max} in °C	Heiße Tage Anzahl	Warme Nächte Anzahl	Globalstrahlung in kWh m ⁻²
TYP2016	18,7	2671	32,8	5	11	475
TYP2016*	19,8	3348	33,4	6	24	475
TRY2010	19,5	3868	36,3	11	10	485
TRY2015	19,1	3012	33,5	6	19	463
TRY2045	19,9	3745	32,6	5	28	442

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Auswahl wesentlicher meteorologischer Datensätze für thermische Gebäudesimulationen, die sich hinsichtlich räumlicher Auflösung, Datengrundlage und Zusammensetzung unterscheiden, erläutert. Anhand ausgewählter Gebäudesimulationen wurde exemplarisch dargelegt, wie stark die Wärmebelastung des Gebäudes von der Wahl der meteorologischen Datensätze abhängt. Vor diesem Hintergrund ist es daher umso wichtiger, den Kontext und Ursprung von antreibenden meteorologischen Datensätzen zu erfassen, um repräsentative Aussagen treffen zu können. Zugleich wurde aufgezeigt, wie stark sich der Einfluss des Stadteffektes auf die Wärmebelastung im Innenraum auswirkt. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Berücksichtigung lokaler Effekte in relevanten Normen bzw. zur Bewertung von Gebäuden und Anpassungsmaßnahmen, um passfähige und effektive Entscheidungen zu treffen. Damit zeigt sich auch perspektivisch die Relevanz der Entwicklung und Verbesserung lokal aufgelöster Datensätze, die aufgrund begrenzter Messstationen nicht nur aus meteorologischen Messdaten bestehen können, sondern auch auf Stadtklimasimulationen – und für zukünftige Szenarien auch auf geeignete Downscaling-Verfahren von Klimamodellausgaben – zurückgreifen müssen.

6 Förderhinweis

HeatResilientCity II wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) als Vorhaben der „Leitinitiative Zukunftsstadt“ im Themenbereich „Klimaresilienz durch Handeln in Stadt und Region“ (FKZ Teilprojekte 01LR2011A und 01LR2011F) und die Aufbau- und Resilienzfazilität (ARF) der Europäischen Union – Next-GenerationEU gefördert.

Literatur

- ALEXANDER, P.J., MILLS, G., 2014: Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island. *Atmosphere* **5**, 755-774, doi: 10.3390/atmos5040755.
- AN DER HEIDEN, M., MUTERS, S., NIEMANN, H., BUCHHOLZ, U., GRABENHENRICH, L., MATZARAKIS, A., 2019: Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* **62**, 571-579, doi: 10.1007/s00103-019-02932-y.
- BRUSE, M., FLEER, H., 1998: Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* **13**, 373-384, doi: 10.1016/S1364-8152(98)00042-5.
- DEMUZERE, M., KITTNER, J., MARTILLI, A., MILLS, G., MOEDE, C., STEWART, I.D., VAN VLIET, J., BECHTEL, B., 2022: A global map of Local Climate Zones to support earth system modelling and urban scale environmental science, *Earth System Science Data* **14**, 3835-3873, doi: 10.5194/essd-14-3835-2022.
- DIN, 2003: DIN 4710:2003-01 – Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland. *Beuth Verlag*, Berlin, 196 S.
- DIN, 2013: DIN 4108-2:2013-02 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. *Beuth Verlag*, Berlin, 34 S.
- DIRKSEN, M., RONDA, R.J., THEEUWES, N.E., PAGANI, G.A., 2019: Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate* **30**, 100498, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100498.
- DWD, 2023: Wetter- und Klimalexikon: Hitze-welle. Abruf am 23.01.2023, URL: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=624852>.
- DWD, BBR, 2011: Projektbericht: Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Deutscher Wetterdienst (Hrsg.). Abruf am 14.04.2023, URL: <https://www.bbsr-geg.bund.de/GEGPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/TRY2011/TRY2011Projekt/Projektbericht.pdf>.
- DWD, BBR, 2017: Projektbericht: Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) Abruf am 14.04.2023, URL: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-projektbericht.pdf>.
- EQUA, 2018: IDA Indoor Climate and Energy 4.8 SP1. Simulationsanwendung der EQUA Solutions AG, Abruf am 14.04.2023, URL: www.equa.se/de/ida-ice.
- HRC, 2023: HeatResilientCity (HRC) II. Hitzeanpassung urbaner Gebäude- und Siedlungsstrukturtypen – Akteursorientierte Umsetzungsbegleitung zur Stärkung der Klimaresilienz und Gesundheitsvorsorge. Projektwebsite. Abruf am 14.04.2023, URL: <http://heatresilientcity.de/>.
- KEIL, M., BOCK, M., ESCH, T., METZ, A., NIELAND, S., PFITZNER, A., 2011: CORINE Land Cover 2006 – Europaweit harmonisierte Aktualisierung der Landbedeckungsdaten für Deutschland – Aktualisierung 2006 für Deutschland. Umweltbundesamt (Hrsg.), 67 S.
- KRÄHENMANN, S., WALTER, A., BRIENEN, S., IMBERY, F., MATZARAKIS, A., 2018: High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany. *Theoretical and Applied Climatology* **131**, doi: 10.1007/s00704-016-2003-7.
- KUTTLER, W., 1997: Städtische Klimamodifikation. *VDI-Berichte* **1330**, 87-108.
- KUTTLER, W., 2012: Climate Change on the Urban Scale – Effects and Counter-Measures in Central Europe. In: CHHETRI, N. (Hrsg.), *Human and Social Dimensions of Climate Change*. *IntechOpen*, doi: 10.5772/50867.

KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.

LECONTE, F., BOUYER, J., CLAVERIE, R., PÉTRIS-SANS, M., 2015: Estimation of spatial air temperature distribution at sub-mesoclimatic scale using the LCZ scheme and mobile measurements. In: Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9) jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, Toulouse, Frankreich.

MARONGA, B., BANZHAF, S., BURMEISTER, C., et al., 2020: Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development* **13**, 1335-1372.

MATZARAKIS, A., 2023: Hitze in Städten – Quantifizierung, Warnsysteme und Hitzeaktionspläne zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 61-70.

METEONORM (Version 6.1.0.20) [Software]. Meteotest AG. Bern, Switzerland.

OKE, T.R., 1973: City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)* **7**, 769-779, doi: 10.1016/0004-6981(73)90140-6.

SALAMANCA, F., GEORGESCU, M., MAHALOV, A., MOUSTAOU, M., WANG, M., 2014: Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **119**, 5949-5965, doi: 10.1002/2013JD021225.

SCHERER, D., 2023: Temperatur und Hitze in der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 15-25.

SCHÜNEMANN, C., SCHIELA, D., ORTLEPP, R., 2021: Guidelines to Calibrate a Multi-Residential Building Simulation Model Addressing Overheating Evaluation and Residents' Influence. *Buildings* **11**, 242, doi: 10.3390/buildings11060242.

SCHÜNEMANN, C., ZIEMANN, A., GOLDBERG, V., ORTLEPP, R., 2020: Urban climate impact on indoor overheating – a model chain approach from urban climate to thermal building simulation. Proceedings of the Proceedings of 26th International Sustainable Development Research Society (ISDRS), Budapest, Ungarn, 15.-17.07.2021.

SCHÜNEMANN, C., ZIEMANN, A., GOLDBERG, V., KUNZE, S., 2022: Model chain from microscale meteorological simulation to building simulation for spatially resolved heat resilience evaluation. *Theoretical and Applied Climatology [submitted]*, doi: 10.21203/rs.3.rs-1496792/v1.

SIMON, H., LINDÉN, J., HOFFMANN, D., BRAUN, P., BRUSE, M., ESPER, J., 2018: Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees – A case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. *Landscape and Urban Planning* **174**, 33-40, doi: 10.1016/j.landurbplan.2018.03.003.

STEWART, I.D., OKE, T.R., 2012: Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**, 1879-1900, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

STEWART, I.D., OKE, T.R., KRAYENHOFF, E.S., 2014: Evaluation of the 'local climate zone' scheme using

temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology* **34**, 1062-1080, doi: 10.1002/joc.3746.

THEEUWES, N.E., STEENEVELD, G.-J., RONDA, R.J., HOLTSLAG, A.A.M., 2017: A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. *International Journal of Climatology* **37**, 443-454, doi: 10.1002/joc.4717.

VDI 2015: VDI 2078. Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation). *Beuth Verlag*, Berlin, 151 S.

WIENERT, U., KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W., 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**, 179-185, doi: 10.1127/0941-2948/2013/0397.

Kontakt

DIPL.-ING. TIM FELIX KRIESTEN
 Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
 Weberplatz 1
 01217 Dresden
 t.kriesten@ioer.de

DR. ASTRID ZIEMANN
 Technische Universität Dresden
 Professur für Meteorologie
 Piennner Str. 23
 01737 Tharandt
 astrid.ziemann@tu-dresden.de

DR. CHRISTOPH SCHÜNEMANN
 Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
 Weberplatz 1
 01217 Dresden
 c.schuenemann@ioer.de

DR. VALERI GOLDBERG
 Technische Universität Dresden
 Professur für Meteorologie
 Piennner Str. 23
 01737 Tharandt
 valeri.goldberg@tu-dresden.de

DR. UTA MODEROW
 Technische Universität Dresden
 Professur für Meteorologie
 Piennner Str. 23
 01737 Tharandt
 uta.moderow@tu-dresden.de

DR.-ING. HABIL. REGINE ORTLEPP
 Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
 Weberplatz 1
 01217 Dresden
 r.ortlepp@ioer.de

8

S. PAULEIT, S. ERLWEIN, S. LINKE, M. RAHMAN, T. ZÖLCH, T. RÖTZER

Grün-blaue Infrastruktur für die Klimawandelanpassung der Stadt

Green-blue infrastructure for the city's climate change adaptation

Zusammenfassung

Grünflächen und Gewässer können als eine grün-blaue Infrastruktur einen wichtigen Beitrag zur Anpassung von Städten an den Klimawandel leisten. Durch Verschattung und Verdunstungskühlung erhöhen sie den thermischen Komfort im Freiraum an heißen Tagen, durch Regenwasserrückhalt, -versickerung und -verdunstung entlasten sie die Kanalisation bei Starkregenereignissen. Untersuchungen in München haben gezeigt, dass in der dicht bebauten Innenstadt eine Erhöhung des Anteils der grün-blauen Infrastruktur auf 20% bis 25% Flächenanteil erforderlich ist, um die Hitzebelastungen nicht weiter zu verstärken. Bäume sind besonders wichtig und sollten bei Flächenmangel mit Fassadenbegrünung kombiniert werden. Detaillierte Untersuchungen von Stadtbäumen zeigen ihre erheblichen Ökosystemleistungen, die je nach Baumart stark variieren. Dachbegrünung ist besonders für den Regenwasserrückhalt erforderlich. Bauliche Nachverdichtung gefährdet die für die Klimawandelanpassung notwendige grün-blaue Infrastruktur. Bei frühzeitiger, umfassender und konsequenter Berücksichtigung über alle Planungsphasen hinweg bestehen aber durchaus gute Chancen, leistungsfähige grün-blaue Infrastrukturen in sich verdichtende Stadtquartiere zu integrieren. Dazu zählen die Sicherung vorhandener alter Baumbestände zur Kühlung der Freiräume tagsüber und die Offenhaltung von Durchlüftungskorridoren für die nächtliche Zufuhr von kühler Luft aus angrenzenden großen Grünflächen. Erforderlich sind neue Mobilitätskonzepte, die den Stellplatzbedarf im Straßenraum drastisch reduzieren und der Verzicht auf Tiefgaragen unter Grünflächen, um Großbäume zu erhalten und neu pflanzen zu können.

Summary

Urban green spaces and water bodies can make an important contribution to climate change adaptation of cities as a green-blue infrastructure. Through shading and evaporative cooling, they increase thermal comfort in outdoor spaces on hot days, and through rainwater retention, infiltration and evaporation, they relieve the burden on the sewage system during heavy rainfall events. Studies in Munich have shown that in the densely built-up inner city, an increase in the proportion of green-blue infrastructure to 20% to 25% of the area is necessary in order not to further exacerbate the heat stress caused by climate change. Trees are particularly important, and should be combined with façade greening if there is a lack of space. Detailed studies of urban trees show their considerable ecosystem services, which vary greatly depending on the tree species. Green roofs are particularly necessary for rainwater retention. Building densification threatens the green-blue infrastructure necessary for climate change adaptation. However, with early, comprehensive and consistent consideration throughout all planning phases, there is a good chance of integrating efficient green-blue infrastructures into densifying urban districts. The protection of existing old tree stands to cool the open spaces during the day and the keeping open of ventilation corridors for the nightly supply of cool air from adjacent large green spaces make this possible. New mobility concepts are required that drastically reduce the need for parking spaces in streets and in underground garages under green spaces to preserve big trees and plant new ones.

1 Einleitung

Vegetationsbestandene Freiräume und Gewässer sind ein wesentlicher Bestandteil städtischer Siedlungsräume. Nach einer Satellitenbilddauswertung (Sentinel-2-Aufnahmen von 2015 und 2017, 10-m-Auflösung) liegt der durchschnittliche

Anteil der baumkronenprojizierten Fläche in Deutschland bei 35% der Siedlungs- und Verkehrsfläche (MEINEL et al. 2022). Hierzu gehört das Grün in öffentlichen Freiräumen, von Parkanlagen bis zu Straßenbegleitgrün, ebenso wie private Grünflächen, etwa in Wohn- und Gewerbegebieten, sowie Brachflächen, auf denen sich Vegetation frei

entwickeln kann (KOWARIK 2015). Nicht zuletzt sind auch Gebäudebegrünungen wie Dach- und Fassadengrün Formen des Stadtgrüns (CVEJIĆ et al. 2015).

Aufgrund ihrer vielfältigen sozialen und ökologischen Leistungen (NATURKAPITAL DEUTSCHLAND - TEEB DE 2016) werden städtische Grünflächen zunehmend als eine urbane grüne oder grün-blaue Infrastruktur (UGI bzw. GBI) bezeichnet (HANSEN et al. 2017). Die grün-blaue Infrastruktur wird inzwischen auch als wichtigste Anpassungsmaßnahme von Städten an den Klimawandel betrachtet (PAULEIT et al. 2020). Im Vordergrund stehen dabei ihre Kühlwirkungen, ihre Funktionen als Korridore für frische und kühle Luft aus dem Stadtumland sowie die Rückhaltung und Versickerung von Regenwasser, um die Kanalisation zu entlasten.

Stadtwachstum führt jedoch zu ständigen Verlusten an grün-blaue Infrastruktur durch zusätzliche Bebauung für Wohnen, Gewerbe und die zugehörige Verkehrserschließung (STATISTISCHES BUNDESAMT 2023). In Deutschland sind durchschnittlich 44% der Siedlungs- und Verkehrsfläche durch Gebäude und befestigte Oberflächen versiegelt. Um den Flächenverbrauch durch neue Siedlungs- und Verkehrsflächen zum Beispiel am Stadtrand zu vermindern, wird eine verstärkte Innenentwicklung angestrebt. Die bauliche Nachverdichtung erhöht jedoch wiederum den Druck auf die grünen und blauen Freiräume (HAALAND und KONIJNENDIJK VAN DEN BOSCH 2015). Wie lässt sich dieses Dilemma durch eine „qualifizierte Innenentwicklung“ (BÖHM et al. 2016) lösen, die grüne-blaue Infrastruktur bei gleichzeitiger baulicher Entwicklung bewahrt und sogar stärkt?

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit den Möglichkeiten und Planungserfordernissen der Klimawandelanpassung durch grün-blaue Infrastrukturen in wachsenden Städten. Im Mittelpunkt steht die Frage, welche Potenziale die grün-blaue Infrastruktur tatsächlich bietet, um heutige und sich zukünftig noch verstärkende Hitzebelastungen erfolgreich zu vermindern, und welche Wirkmechanismen zugrunde liegen. Wie ist grün-blaue Infrastruktur zu planen und zu gestalten, um die gewünschten human-biometeorologischen Wirkungen auf begrenztem Raum möglichst optimal zu entfalten? Ferner versucht der Beitrag eine Antwort darauf zu geben, wie es der Stadtplanung gelingen kann, grün-blaue Infrastrukturen in sich verdichtende Stadtstrukturen zu integrieren.

2 Kühlung durch grün-blaue Infrastruktur: Wirkmechanismen

Der Ausbau städtischer Grünflächen, insbesondere von Stadtbäumen, stellt eine der wichtigsten Maßnahmen zur Abschwächung der städtischen Wärmeinsel (*Urban Heat Island*, UHI) dar (OKE 2011, KUTTLER und GROSS 2023, SCHERER 2023) und bietet Fußgängern einen höheren thermischen Komfort (RAHMAN et al. 2020). Die intensi-

ven Forschungen der letzten Jahrzehnte zeigen das Ausmaß sowie die Muster und Prozesse des Kühlspotenzials von Bäumen auf. Die kühlende Wirkung durch Bäume verminderte die Lufttemperatur im Schatten von Bäumen an heißen Sommertagen um etwa 1 K bei Messungen an Winterlinden in München und im Kronenraum sogar um bis zu 3,5 K (RAHMAN et al. 2017). Die physiologische Äquivalenttemperatur (PET) – ein biometeorologischer Index für den thermischen Komfort des Menschen (MATZARAKIS 2023) – wurde sogar um bis zu 15 K reduziert (RAHMAN et al. 2020). Das Kühlpotenzial von Bäumen variiert jedoch je nach Klima, Baumart und lokalen mikroklimatischen Bedingungen sehr stark. Zwei Hauptmechanismen sind für die Kühlung verantwortlich: der Beschattungseffekt und die Kühlung durch Verdunstung (Abb. 8-1). Durch Beschattung kann die eintreffende kurzwellige Strahlung um bis zu 90% reduziert werden (KONARSKA et al. 2014) und damit die Oberflächentemperatur um bis zu 40 K gesenkt werden (RAHMAN et al. 2021).

Bei der Beschattungswirkung eines Standorts sind die wichtigsten zu berücksichtigenden Variablen die Dichte der Baumkronen und die Fläche, die sie einnehmen (Abb. 8-2). Je dichter die Baumkronen sind, desto mehr einfallende kurzwellige Strahlung wird abgehalten. Dabei erfordern stark versiegelte Flächen hohe Dichten der Baumkronen, um tagsüber maximalen Schutz vor Hitze zu bieten.

Die Kühlleistung durch Beschattung variiert bei den vier untersuchten Baumarten Winterlinde (*Tilia cordata*), Platane (*Platanus x acerifolia*), Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) stark (RÖTZER et al. 2019). Während die Platane eine hohe beschattete Fläche aufweist, zeigt sie gleichzeitig eine sehr geringe Schattendichte (gemessen als m^2 Blattfläche pro m^3 Kronenvolumen). Umgekehrt ist die Schattenfläche von Rosskastanien zwar gegenüber allen anderen Baumarten in allen Altersklassen die geringste, die Schattendichte ist jedoch insbesondere bei älteren Rosskastanien am höchsten.

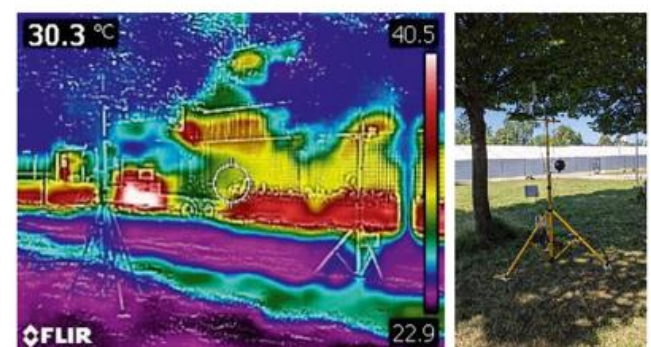


Abbildung 8-1: Links: Kühlung durch Beschattung: Infrarot-Wärmebild von beschatteten und unbeschatteten Flächen auf einem Versuchsgelände der TU München in Freising (rot-gelb-blau-lila: hohe → niedrige Temperaturen). Rechts: Biometeorologische Messungen verschiedener Parameter im Schatten von Bäumen über einer Grasfläche auf dem gleichen Versuchsgelände der TU München in Freising.

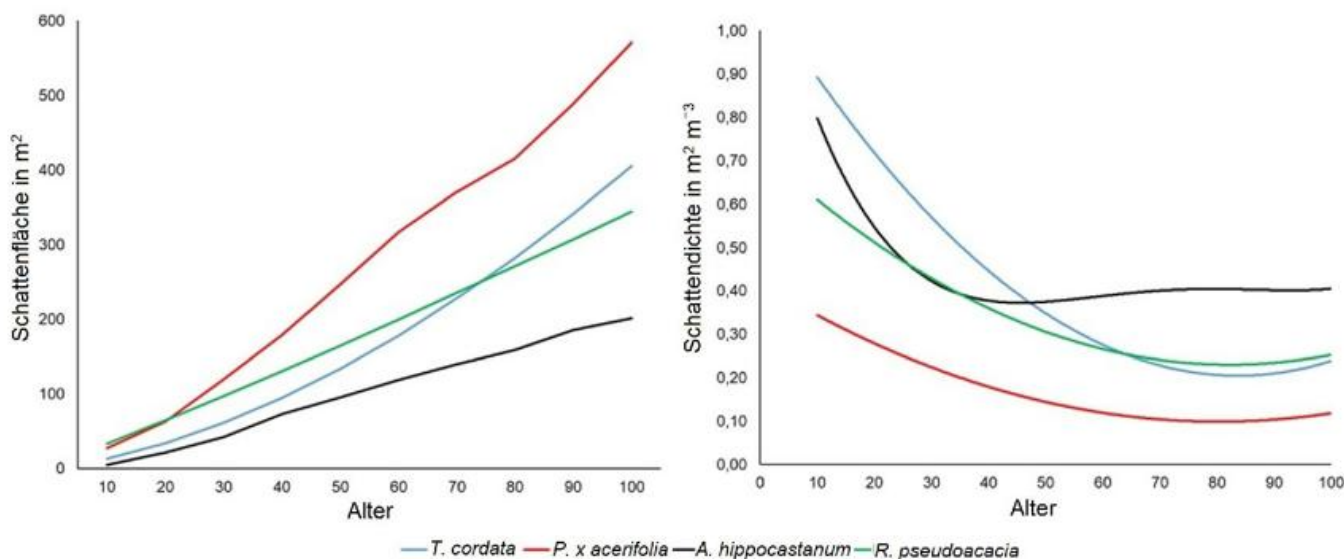


Abbildung 8-2: Schattenfläche und -dichte im Mittel für süddeutsche Städte in Abhängigkeit von Baumart und Baumalter. Links: Mittel der Schattenflächen auf einer horizontalen Ebene für den 21. Juni bezogen auf den Sonnenstand von 8.00 bis 18.00 Uhr für eine geographische Breite von 48°. Rechts: Schattendichte definiert als m² Blattfläche pro m³ Kronenvolumen.

Die Kühlung durch Evapotranspiration ist der zweite wichtige Mechanismus zur Beeinflussung des Mikroklimas (Abb. 8-1). Durch Evapotranspiration reduzieren Bäume den fühlbaren Wärmestrom (Q_H) um bis zu 50 %, sodass die Lufttemperaturen im Schatten von Bäumen um bis zu 35 % niedriger sein können als im Schatten von Gebäuden (RAHMAN et al. 2021). Das Ausmaß der Abkühlung durch Bäume variiert jedoch auch je nach Bodenfeuchtigkeit und Luftturbulenz am jeweiligen Standort.

Bäume können die Verdunstung über ihre Spaltöffnungen regulieren und damit die Lufttemperatur in der Blattgrenzschicht beeinflussen. Die Höhe der Verdunstung ist sehr stark von der Baumart, das heißt von Merkmalen wie der Anatomie des wasserleitenden Holzes (Xylem) und der Wassernutzungseffizienz, sowie von den strukturellen Merkmalen eines Baumes wie Höhe, Schattendichte und Ausdehnung der Baumkronen, abhängig.

Abbildung 8-3a zeigt, dass das Alter und damit die Größe eines Baumes eine große Rolle für das Ausmaß der Kühlwirkung spielen. So liegt die mittlere jährliche Kühlleistung durch Transpiration in süddeutschen Städten bei jungen Bäumen mit einem Alter von weniger als 35 Jahren bei unter 15.000 kWh. Alte Bäume (über 75 Jahre) weisen Kühlleistungen von bis zu 90.000 kWh auf.

Eine Kühlleistung von 15.000 kWh pro Jahr – wie sie eine ca. 30-jährige Platane aufweist – entspricht dabei einer Transpirationssumme von etwa 22.000 l pro Jahr (Umrechnungsfaktor: $0,68 \text{ kWh l}^{-1}$). Nimmt man an, dass die Dauer der Vegetationszeit, in der Bäume über ihre Blätter transpirieren in unseren Breiten bei 180 Tagen liegt, verdunstet eine junge Platane in etwa 122 l pro Tag.

Die Unterschiede in der Kühlleistung zwischen den Baumarten sind dabei enorm. So hat eine alte Rosskastanie

eine jährliche Kühlleistung von ca. 40.000 kWh, eine Platane hingegen kommt auf mehr als das doppelte (ca. 94.000 kWh).

Jedoch werden die Kühlleistungen von Bäumen auch durch die vorherrschenden Standortbedingungen stark geprägt (STRATOPOULOS et al. 2018, MOSER-REISCHL et al. 2019, RÖTZER et al. 2021). So verringert sich mit zunehmender Höhe der versiegelten Fläche unterhalb eines Baumes die Wasserverfügbarkeit und damit sein Kühlleistungspotenzial deutlich. Winterlinden werden dabei stärker in ihrer Kühlleistung beeinflusst als Robinien (Abb. 8-3b). Rasenflächen mit Bäumen, die lichte Kronen haben, weisen eine höhere Gesamtverdunstung (Bäume und Böden) und damit eine größere Kühlleistung auf als Bäume mit dichten Baumkronen auf einem stark versiegelten Untergrund, sofern keine Bodentrockenheit vorliegt.

Die großräumige Stadtentwicklung der letzten Jahrzehnte hat neben der Verstärkung der städtischen Wärmeinsel auch den Wasserkreislauf unserer Städte verändert und zu einem höheren Oberflächenabfluss geführt. In den letzten vier Jahrzehnten haben die wirtschaftlichen Auswirkungen von Überschwemmungen in Städten weltweit Kosten von mehr als einer Milliarde US-Dollar verursacht und Hunderttausende von Menschenleben gefordert (ROSENZWEIG et al. 2021, WINTERRATH et al. 2023). Städtische Grünflächen, insbesondere Bäume, können jedoch den Abfluss erheblich verringern (RÖTZER et al. 2019). Baumkronen fangen den Niederschlag auf und das Wasser kann dann von dort verdunsten (Interzeption; je nach Baumart bis zu 20 %, RAHMAN et al. 2023), ohne den Boden zu erreichen. Weiterhin kann der Abfluss durch höhere Transpirationssummen und eine bessere Bodenwasserspeicherung reduziert werden. Alle genannten Mechanismen der Niederschlagsaufteilung durch Bäume werden durch die Art und das Ausmaß des Nie-

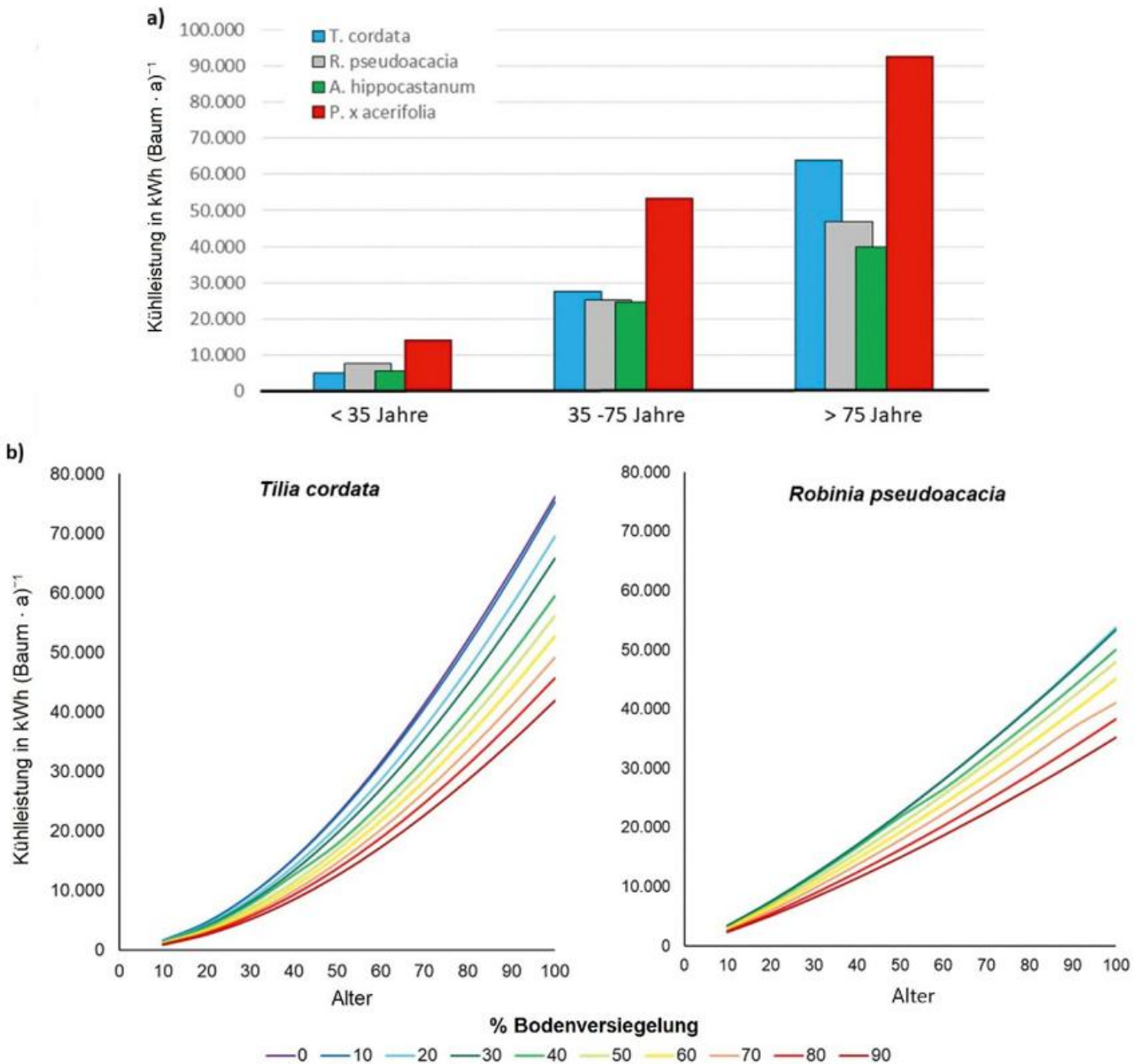


Abbildung 8-3: a) Transpirationskühlung (in Form von Energieverlusten pro Baum und Jahr) von vier verschiedenen Baumarten für drei Altersklassen; b) Transpirationskühlung von Winterlinde (*T. cordata*) und Scheinakazie (*R. pseudoacacia*) in Abhängigkeit des Alters und der Bodenversiegelung in Mittel für süddeutsche Städte (nach RÖTZER et al. 2021).

derschlagsereignisses, der Wetterbedingungen sowie die funktionalen Vegetationstypen beeinflusst (GUEVARA-ESCOBAR et al. 2007). Im Allgemeinen sorgen breitere und dichtere Baumkronen für ein besseres Abfangen von Niederschlägen. Das Ausmaß der Verdunstung und der Bodeninfiltration ist jedoch auch vom Wachstum der Bäume, das wiederum Art- und altersspezifisch ist, abhängig. In einem Experiment stellten RAHMAN et al. (2019) fest, dass bei der schnell wachsenden Robinie (*Robinia pseudoacacia*) die Bodeninfiltration durch das intensive Feinwurzelsystem eineinhalbmal höher ist als bei Winterlinde (*Tilia cordata*), mit einem weniger starken Feinwurzelsystem. Jedoch zeigte *Tilia cordata* eine dreimal höhere Transpirationsrate im Vergleich zu *Robinia pseudoacacia*, was mit den physiologischen Eigenschaf-

ten der Baumart und dem tieferreichenden Wurzelsystem zusammenhängt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein standortspezifischer, ganzheitlicher Ansatz bei der Auswahl von Baumarten in Kombination mit der Art der Oberflächenbedeckung für einen Standort erforderlich ist, um Ökosystemleistungen zu optimieren, das heißt um beispielsweise den Abfluss zu verringern und die Kühlleistung zu steigern.

3 Potenziale der Klimawandelanpassung durch grün-blaue Infrastrukturen

Verschiedene Arten von grün-blauer Infrastruktur erbringen unterschiedliche regulierende Leistungen für die Kli-

maanpassung im urbanen Raum. Die Leistungen von Stadtbäumen, Fassaden- und Dachbegrünungen wurden in zwei verschiedenen Siedlungstypen (Blockrandbebauung und Zeilenbebauung) quantifiziert (LANG et al. 2018). Die Ergebnisse für die Blockrandbebauung sind dabei besonders interessant, da es sich um dicht bebaute Innenstadtquartiere handelt, die bereits heute während hochsommerlicher Hitzeepisoden besonderen thermischen Belastungen ausgesetzt sind. Für die Simulationen wurde ein heißer Tag mit einer Lufttemperatur von 32,2 °C um 15 Uhr ausgewählt (Tabelle 8-1; ZÖLCH et al. 2016). Die Lufttemperatur würde sich im moderaten Klimawandelzenario A1B im Jahr 2050 auf 35,5 °C erhöhen. Die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) würde im Durchschnitt von heute 41,1 °C auf 43,5 °C im Jahr 2050 zunehmen und damit den Hitzestress weiter verstärken. Es zeigte sich, dass eine Erhöhung des Grünflächenanteils von aktuell weniger als 10% auf mindestens 20% bis 25% nötig wäre, um diese Verschlechterung der thermischen Verhältnisse in den Freiräumen solcher Quartiere bis zum Jahr 2050 zu vermeiden.

die PET auf 1,4 m Höhe bei maximaler Fassadenbegrünung gemittelt über das Untersuchungsgebiet um etwa 4 K unter die heutigen klimatischen Bedingungen. Dachbegrünungen reduzieren insbesondere Oberflächentemperaturen und damit die Wärmespeicherung in der Bausubstanz. Auswirkungen auf den thermischen Komfort im öffentlichen Raum (Straßenniveau) hat die Dachbegrünung mit einer Verminderung der PET um etwa 0,2 K jedoch kaum (ZÖLCH et al. 2016). Besonders wirksam für die Klimaanpassung sind begrünte Dächer jedoch für den Regenrückhalt; bei Starkregenereignissen wirken sie wie ein Puffer, bevor ein Teil des Niederschlagswassers der Kanalisation zugeführt wird (ZÖLCH et al. 2017). Ferner kann Dachbegrünung als Isolation für das darunterliegende Haus wirken und so die Hitzelast im Gebäude vermindern. Es können Kühlungseffekte von bis zu 1 K bei der Innenraumtemperatur erreicht werden (VON TILS 2020).

Ziel der Klimawandelanpassung durch grüne Infrastruktur sollte daher die Kombination der drei untersuchten Be-

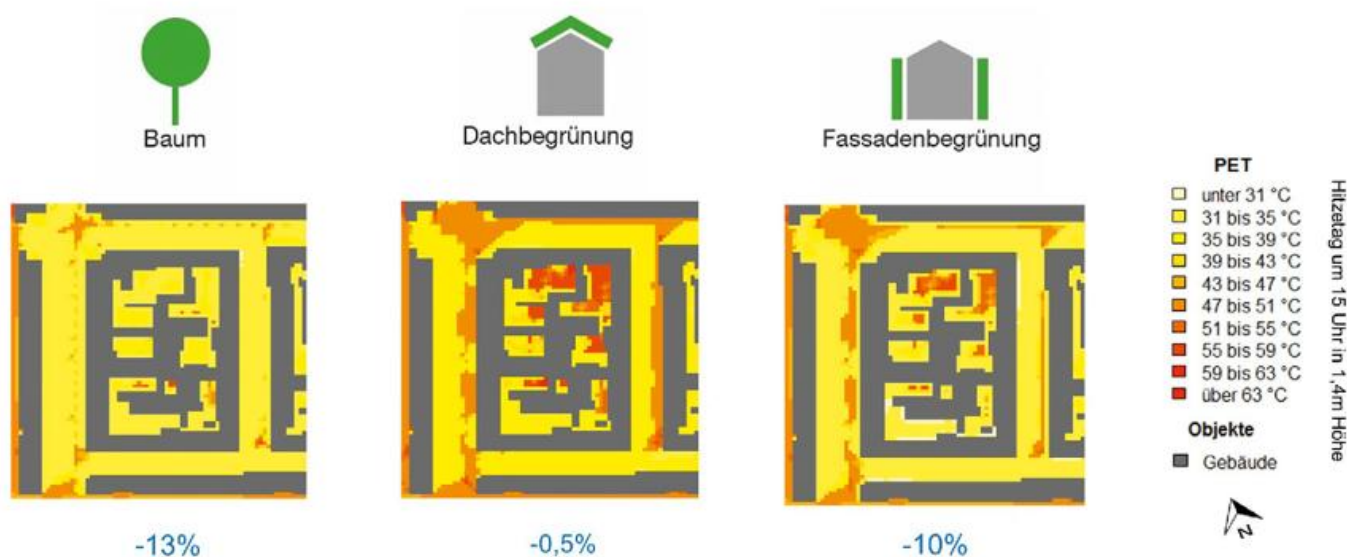


Abbildung 8-4: Simulierter thermischer Komfort im Außenbereich (Index: physiologisch äquivalente Temperatur, PET) für eine Blockbebauung an einem Beispiel aus der Münchner Maxvorstadt. Die Abbildungen zeigen die verschiedenen räumlichen Auswirkungen der drei Begrünungsmaßnahmen Baumpflanzungen, Dach- und Fassadenbegrünung, während die Prozentzahlen die relative Reduktion des Hitzestresses im Vergleich zur Bestandssituation ausdrücken (nach ZÖLCH et al. 2016).

Bäume erreichten in dieser Studie durch Verschattung und Verdunstung den größten Kühleffekt (Abb. 8-4, Tabelle 8-1). Sie vermindern die PET um bis zu 6 K im Vergleich zur Bestandssituation (im Wesentlichen durch die Beschattung) mit einem maximalen Begrünungsszenario, in dem alle Freiräume von Bäumen überschirmt würden. Fassadenbegrünung verschattet die Fassaden, vor denen sie angebracht ist, senkt deren Wärmestrahlung und leistet auch Verdunstungskühlung. Ihre Kühlwirkung beschränkt sich aber auf ein Umfeld von wenigen Metern um die Begrünung. In der Studie reduziert sich

grünungsmaßnahmen sein. Interessanterweise steht für die Erhöhung des Baumanteils in solchen Quartieren genügend Raum in Straßen und Höfen zur Verfügung. Er wird jedoch sowohl auf der Oberfläche durchfahrenden und ruhenden Verkehr und im Untergrund durch eine Vielzahl von Leitungen beansprucht. Eine umfassende Begrünung lässt sich daher nur erreichen, wenn durch neue Konzepte für die Mobilität und technische Infrastrukturen Platz geschaffen werden kann. Ferner sind private Grundstückseigentümer zur Umsetzung von Hofbegrünungen zu motivieren.

Tabelle 8-1: Auswirkungen der drei Begrünungsvarianten Baumpflanzung, Dach- und Fassadenbegrünung auf den thermischen Komfort im Untersuchungsgebiet Maxvorstadt, München (Blockrandbebauung) im Außenraum in 1,4 m Höhe.

Begrünungsszenario mit Flächenanteil (R = Realistische Umsetzung, M = Maximale Umsetzung)		Veränderung der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET in °C)	
		Heute: 41,1 °C	2050: 43,5 °C
BaumR	24 % Baum	36,5	39,0
BaumM	34 % Baum	35,3	37,6
DachR	9 % Dach	41,1	43,5
DachM	47 % Dach	40,9	43,5
FassadeR	4 % Fassaden	39,0	41,3
FassadeM	11 % Fassaden	37,1	39,2

Neben der Art der grün-blauen Infrastruktur spielt die Qualität und Ausgestaltung eine entscheidende Rolle für die Klimaregulationsleistung des Stadtgrüns. In dem Projekt „Grüne Stadt der Zukunft“ wurde für eine Geschosswohnungssiedlung in Zeilenbauweise analysiert, ob sich negative Beeinträchtigungen des Mikroklimas durch Nachverdichtung mit Grüner Infrastruktur kompensieren lassen (ERLWEIN et al. 2021). Als Kenngröße für den menschlichen thermischen Komfort diente ebenfalls der Index PET. In den Szenarien wurde davon ausgegangen, dass der aktuelle Baumbestand aufgrund von Tiefgaragenbauten im Zuge der Nachverdichtung in jedem zweiten Innenhof weichen muss. Um 14 Uhr an einem typischen heißen Tag führt dies zu einer deutlichen Steigerung des empfundenen Hitzestresses gegenüber dem Ausgangszustand (= Status Quo, siehe Abb. 8-5). Die fünf Jahre alten Bäume entfalten nur eine geringe Kühlwirkung, während 40 bis 50 Jahre alte Bäume sogar eine Verbesserung

gegenüber dem Status Quo erzielen. Die Kühlwirkung von schattenspendenden Altbäumen lässt sich also nur langfristig durch Neupflanzungen kompensieren. Diese Erkenntnis ist besonders relevant, wenn bei Nachverdichtungsfällen der zusätzlich entstehende Stellplatzbedarf gedeckt werden muss. Oft werden Tiefgaragen in die Freiräume zwischen den Häuserzeilen gebaut und in dem Zuge die alten Baumbestände entfernt. Eine drastische Verschlechterung der thermischen Verhältnisse kann die Folge sein. Entscheidend ist zudem die Platzierung von Baumstandorten: Um kälteren Jahreszeiten aber auch der nächtlichen Abkühlung im Sommer gerecht zu werden, sollte für eine mikroklimatische Variabilität gesorgt werden: Werden Bäume nicht flächendeckend zwischen den Häuserzeilen, sondern nur in Gruppen zur Verschattung der heißesten Stellen gepflanzt, werden Korridore für die nächtliche Durchlüftung mit kühlerer Luft aus einer angrenzenden Grünfläche offengehalten.

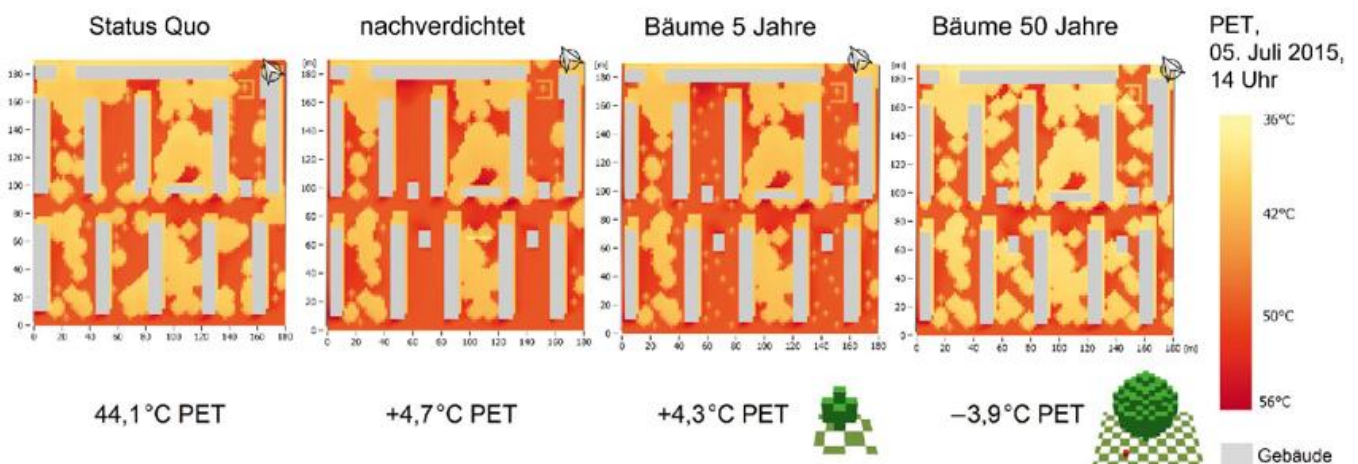


Abbildung 8-5: Simulierter thermischer Komfort im Außenbereich (Index: physiologisch äquivalente Temperatur, PET) für einen Bereich mit Zeilenbauten im Quartier München-Moosach. Verglichen ist der Ausgangszustand (Status Quo) mit dem Nachverdichtungsfall sowie Szenarien mit Bäumen 5 Jahre bzw. 50 Jahre nach der Pflanzung. Die Werte unter den Grafiken geben die Abweichung von dem Median des Ausgangszustandes wieder. Die Ergebnisse beziehen sich auf den 05. Juli 2015, einen heißen, windarmen Sommertag, und sind Durchschnittswerte für die Zeit von 10 bis 16 Uhr (nach ERLWEIN et al. 2021).

Ein weiteres Potenzial grün-blauer Infrastruktur besteht in der Anpassung an Starkregenereignisse. Zu den grün-blauen Maßnahmen für eine nachhaltige Regenwasserbewirtschaftung zählen Gründächer, Regengärten und durchlässige Beläge. In dem Beispielfall einer Geschosswohnsiedlung wurde der Nutzen dieser Maßnahmen mithilfe von Simulationen mit dem hydrologischen Modell PCSWMM (JAMES et al. 2010) für 15-minütige Starkregenereignisse untersucht. Der Einsatz von grün-blauen Maßnahmen zum lokalen Regenwassermanagement reduziert den an die Kanalisation angeschlossenen befestigten Flächenanteil von 54 % auf 6 % und versickert und speichert den Großteil des Regenwassers bei gegenwärtigen Starkregenereignissen mit Wiederkehrperioden von zwei und zehn Jahren (Rückhalt von 97 % bzw. 94 %). Ohne diese Maßnahmen, wie umfassende Dachbegrünung, Regengärten und Versickerungsmulden, können nur 40 % bzw. 45 % des Niederschlagswassers zurückgehalten werden (ROSENBERGER et al. 2021). Grün-blaue Infrastruktur vermindert damit den Oberflächenabfluss deutlich. Sie vermeidet Belastungen für die Kanalisation, die im Zuge des Klimawandels noch zunehmen dürften und gewinnt Regenwasser als wertvolle Ressource für die Stadt zurück.

4 Planung grün-blauer Infrastrukturen in sich verdichtenden Städten: Chancen und Voraussetzungen

Die Potenziale von grün-blauer Infrastruktur für die klimaangepasste Stadt werden zunehmend erkannt. Trotzdem steht die Planung und Umsetzung dieser Maßnahmen vor großen Herausforderungen: Nicht nur im Neubau, sondern vor allem in der Weiterentwicklung bzw. im Umbau von stark versiegelten Bestandsquartieren zeigen sich oft starke Zielkonflikte. Häufig sind innerstädtische Flächen knapp und müssen unterschiedlichen Ansprüchen gerecht werden, etwa für Mobilität, Erholung, Regenwassermanagement und verschiedene ökonomische Funktionen. Hier gilt es, auf der einen Seite Flächenpotenziale für grün-blaue Infrastrukturen auszuloten (auch Dach und Fassade), Räume multifunktional zu nutzen (z. B. durch die Kombination von Retentionsflächen und Kinderspielplätzen) und auf der anderen Seite versiegelte Flächen und Verkehrsflächen zu reduzieren (unter anderem durch Reduktion des Stellplatzschlüssels, Entsiegelung von z. B. Innenhöfen). Ohne eine kommunalpolitische Priorisierung von Zielen

des Klimaschutzes und der Klimawandelanpassung werden sich diese Zielkonflikte nur schwer lösen lassen. Andererseits sind unklare Zuständigkeiten oder Hemmnisse aus sektoraler Gesetzgebung und Regelwerken, etwa zum Straßenbau, zu beseitigen, um multifunktionale Lösungsansätze zu ermöglichen. Für eine interdisziplinäre Planung und die Umsetzung grün-blauer Infrastruktur werden auch finanzielle und personelle Ressourcen benötigt. Auch wenn sich klimaorientierte Maßnahmen langfristig in jedem Fall lohnen, ist der Planungs- und Erstellungsaufwand durch Fachpersonal und die Kosten für Maßnahmen (z. B. Retentionsdächer, Grünflächenunterhalt) zunächst häufig erhöht. An anderer Stelle können aber vor allem im Neubau Kosten gespart werden, etwa durch einen geringeren Investitionsbedarf in konventionelle Infrastrukturen wie das Kanalnetz durch lokales Regenwassermanagement. Diese Mittel sollten dem Ausbau und Unterhalt der grünen Infrastruktur zugutekommen.

Neben einem Bedarf an mehr Fachpersonal ist auch entscheidend, die Planungsbeteiligten von Anfang an zu vernetzen und die ressort- und disziplinenübergreifende Zusammenarbeit zu fördern (Tabelle 8-2). So können Zielkonflikte frühzeitig aufgedeckt und gemeinsam ausgehandelt werden. Eine vertrauensvolle und transparente Zusammenarbeit zwischen den Planungsbeteiligten vereinfacht Planungsprozesse. Nicht zuletzt kann eine Kooperation helfen, neuartige Lösungen zu entwickeln und gemeinsam zu erproben.

Um langfristig nicht nur einzelne Quartiere, sondern eine ganze Stadt klimaangepasst weiterzuentwickeln, bieten sich übergeordnete und ressortübergreifende Ziele und Leitlinien an. Auch wenn diese informellen Instrumente keine rechtliche Verbindlichkeit mit sich bringen, etwa für Grundstückseigentümer und Investoren, sind sie durch die sogenannte Behördenverbindlichkeit durchaus wirksam. Auch stadtweite Satzungen (wie Freiflächengestaltungssatzungen) sind wichtige Werkzeuge zur Sicherung und Entwicklung der grünen Infrastruktur. In weiteren Schritten sind alle Instrumente auf den verschiedenen Ebenen in der Stadt- und Freiraumplanung sowie auch in weiteren Fachplanungen (z. B. Umwelt-, Naturschutz- und Energiebereich) klimaorientiert einzusetzen. Wichtige Instrumente sind in diesem Zusammenhang der Flächennutzungsplan, der Bebauungsplan (ARNDT 2020), aber auch zunehmend informelle Instrumente wie Wettbewerbe,

Tabelle 8-2: Berücksichtigung klimarelevanter Belange in der Planung.

Frühzeitig	Ganzheitlich	Konsistent
Klimabelange möglichst frühzeitig integrieren, vor allem in der Grundlagenermittlung (z. B. durch vertiefende mikro-klimatische oder hydrologische Fachgutachten)	Interdisziplinäre Planungsteams bilden, klimarelevante Inhalte berücksichtigen, Planungsbeteiligte und planungsbetroffene Fachstellen einbeziehen	Klimaorientierung konsistent, also in allen Planungsschritten, integrieren und auch Monitoring und Unterhalt einbeziehen. Nachträgliche Planänderungen dürfen nicht dazu führen, dass Klimabelange vernachlässigt werden. Je konkreter die Planungen werden, desto häufiger müssen grün-blaue Infrastrukturen verteidigt werden.

Rahmenpläne oder planungsbegleitende Partizipationsformate. Wichtig ist bei jeder Planung – unabhängig von der Wahl der Instrumente – alle rechtlichen Möglichkeiten auszunutzen und einzusetzen (von Pflanzgeboten und Fassaden- und Dachgrünungspflichten bis hin zu Rückbaugeboten). Das erfordert eine Zusammenarbeit aller Planungsbeteiligten.

Klimaorientierung endet aber nicht nach der Plan- oder Baufertigstellung. Ein entscheidender Punkt für wirksame grün-blaue Infrastruktur ist der Unterhalt. Dieser ist bereits in der Planung, beispielsweise durch städtebauliche Verträge, langfristig sicherzustellen.

5 Ausblick: Die klimaresiliente grün-blaue Stadt der Zukunft

Die rasche Transformation der Städte ist eine entscheidende Zukunftsaufgabe für eine global und lokal nachhaltige Entwicklung, die das Klima schützt und die Resilienz unserer Gesellschaft gegenüber den nicht mehr zu vermeidenden Folgen des Klimawandels stärkt. Die grün-blaue Infrastruktur ist ein Schlüssel zur erfolgreichen Bewältigung dieser Herausforderungen. Erforderlich sind gut vernetzte Systeme grüner und blauer Freiräume, die öffentliche und private Flächen einbeziehen, und vielfältige Ökosystemleistungen erbringen können. Auch Gebäude und bisher versiegelte Flächen müssen Teil der grünen Infrastruktur werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass dieser Anspruch auch auf eng begrenztem Raum in dicht bebauten Innenstädten und in Vorhaben der baulichen Nachverdichtung erfüllt werden kann. Besonders Bäume haben sich als wirkungsvolle Maßnahme zur Klimawandelanpassung gezeigt. Ihre Kühlwirkung unterscheidet sich stark je nach Baumart, aber auch dem Standort. Eine geringe Bodenversiegelung und gute Wasserversorgung werden im Klimawandel noch wichtiger als sie es bereits heute sind, dazu kommt die Auswahl trockenheitsangepasster Baumarten besonders in Straßenräumen und auf befestigten Plätzen.

Voraussetzung für die Entwicklung der grünen Infrastruktur ist, dass sie in kooperativen und bürgernahen Planungsverfahren frühzeitig, konsistent und umfassend berücksichtigt wird. Die grün-blaue Infrastruktur ist dabei klug mit technischen und sozialen Infrastrukturen zu verbinden, um zu kreativen Lösungen etwa für eine nachhaltige Mobilität in biodiversen und klimaangepassten grünen Korridoren zu gelangen, die das Regenwasser etwa für die Bewässerung der Bäume nutzen, statt die Kanalisation zu überlasten („Schwammstadt-konzept“). Grün-blaue Infrastruktur kann den thermischen Komfort im Außenraum auch an heißen Tagen sicherstellen, und gleichzeitig die Notwendigkeit zum Einbau von Klimaanlagen in Gebäuden vermindern oder vermeiden helfen. Schließlich soll sie für das Zusammenleben von Mensch, Pflanze und Tier qualitätsvolle Lebensräume bieten.

Literatur

- ARNDT, M., 2020: Klimaschutz und Klimaanpassung in der Bauleitplanung. *Umwelt und Planungsrecht* **12**, 481-488.
- BÖHM, J., BÖHME, C., BUNZEL, A., KÜHNAU, C., REINKE, M., 2016: Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. Entwicklung von naturschutzfachlichen Zielen und Orientierungswerten für die planerische Umsetzung der doppelten Innenentwicklung sowie als Grundlage für ein entsprechendes Flächenmanagement. *BfN-Skripten* **444**, Bonn und Bad Godesberg.
- BRUSE, M., FLEER, H., 1998: Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* **13**(3/4), 373-384, doi: 10.1016/S1364-8152(98)00042-5.
- CVEJIĆ, R., ELER, K., PINTAR, M., ŽELEZNIKAR, Š., HAASE, D., KABISCH, N., STROHBACH, M., 2015: A Typology of Urban Green Spaces, Ecosystem Provisioning Services and Demands. Abruf am 21.04.2023, URL: <https://www.e-pages.dk/ku/1334/html5/>.
- ERLWEIN, S., ZÖLCH, T., PAULEIT, S., 2021: Regulating the microclimate with urban green in densifying cities: Joint assessment on two scales. *Building and Environment* **205**, 108233, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108233.
- GUEVARA-ESCOBAR, A., GONZÁLEZ-SOSA, E., VÉLIZ-CHÁVEZ, C., VENTURA-RAMOS, E., RAMOS-SALINAS, M., 2007: Rainfall interception and distribution patterns of gross precipitation around an isolated Ficus benjamina tree in an urban area. *Journal of Hydrology* **333**, 532-541, doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.017.
- HAALAND, C., KONIJNENDIJK VAN DEN BOSCH, C., 2015: Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. *Urban Forestry & Urban Greening* **14**, 760-771, doi: 10.1016/j.ufug.2015.07.009.
- HANSEN, R., ROLF, W., PAULEIT, S., BORN, D., BARTZ, R., KOWARIK, I., LINDSCHULTE, K., BECKER, C.W., SCHRÖDER, A., 2017: Urbane Grüne Infrastruktur: Grundlage für attraktive und zukunftsfähige Städte. Hinweise für die kommunale Praxis, Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- JAMES, W., ROSSMAN, L.A., JAMES, W.R.C., 2010: User's guide to SWMM 5, 13. ed, Water systems models. *CHI press*, Guelph, Ontario, Kanada.
- KONARSKA, J., LINDBERG, F., LARSSON, A., THORSSON, S., HOLMER, B., 2014: Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees-application for outdoor thermal comfort modelling. *Theoretical and Applied Climatology* **117**(3-4), 363-376, doi: 10.1007/s00704-013-1000-3.
- KOWARIK, I., 2015: Wildnis in urbanen Räumen. Erscheinungsformen, Chancen und Herausforderungen. *Natur und Landschaft* **90**(9/10), 470-474, doi: 10.17433/9.2015.50153363.470-474.

- KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.
- LANG, W., PAULEIT, S., BRASCHE, J., HAUSLADEN, G., MADERSPACHER, J., SCHELLE, R., ZÖLCH, T., 2018: Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern – Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München.
- MATZARAKIS, A., 2023: Hitze in Städten – Quantifizierung, Warnsysteme und Hitzeaktionspläne zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 61-70.
- MEINEL, G., KRÜGER, T., EICHLER, L., WURM, M., TENIKL, J., FRICK, A., WAGNER, K., FINA, S., 2022: Wie grün sind deutsche Städte? Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), BBSR-Online-Publikation 03/2022, Bonn.
- MOSER-REISCHL, A., RAHMAN, M.A., PAULEIT, S., PRETZSCH, H., RÖTZER, T., 2019: Growth patterns and effects of urban micro-climate on two physiologically contrasting urban tree species. *Landscape and Urban Planning* **183**, 88-99, doi: 10.1016/j.landurbplan.2018.11.004.
- NATURKAPITAL DEUTSCHLAND – TEEB DE, 2016: Ökosystemleistungen in der Stadt – Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Berlin, Leipzig.
- OKE, T.R., 2011: Urban heat islands. DOUGLAS, I., GOODE, D., HOUCK, M. WANG, R. (Hrsg.), *The Routledge Handbook of Urban Ecology*, 120-131, Routledge, London.
- PAULEIT, S., FRYD, O., BACKHAUS, A., JENSEN, M.B., 2020: Green Infrastructures to Face Climate Change in an Urbanizing World. In: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. MEYERS, R. (Hrsg.), Springer, New York, doi: 10.1007/978-1-4939-2493-6_212-3.
- RAHMAN, M.A., DERVISHI, V., MOSER-REISCHL, A., LUDWIG, F., PRETZSCH, H., RÖTZER, T., PAULEIT, S., 2021: Comparative analysis of shade and underlying surfaces on cooling effect. *Urban Forestry & Urban Greening* **63**, 127223, doi: 10.1016/j.ufug.2021.127223
- RAHMAN, M.A., HARTMANN, C., MOSER-REISCHL, A., FREIFRAU VON STRACHWITZ, M., PAETH, H., PRETZSCH, H., PAULEIT, S., RÖTZER, T., 2020: Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. *Agric. For. Meteorol.* **287**, 107947, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.107947.
- RAHMAN, M.A., MOSER A., ANDERSON M., ZHANG, C., RÖTZER, T., PAULEIT, S., 2019: Comparing the infiltration potentials of soils beneath the canopies of two contrasting urban tree species. *Urban Forestry and Urban Greening* **38**, 22-32, doi: 10.1016/j.ufug.2018.11.002.
- RAHMAN, M.A., MOSER, A., RÖTZER, T., PAULEIT, S., 2017: Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Building and Environment* **114**, 118-128, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.12.013.
- RAHMAN, M.A., PAWIJIT, Y., XU, C., MOSER-REISCHL, A., PRETZSCH, H., RÖTZER, T. PAULEIT, S., 2023: A comparative analysis of urban forests for storm-water management. *Scientific Reports* **13**, 1451, doi: 10.1038/s41598-023-28629-6.
- ROSENBERGER, L., LEANDRO, J., PAULEIT, S., ERLWEIN, S., 2021: Sustainable stormwater management under the impact of climate change and urban densification. *Journal of Hydrology* **596**, 126137, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126137.
- ROSENZWEIG, B.R., HERREROS CANTIS, P., KIM, Y., COHN, A., GROVE, K., BROCK, J., YESUF, J., MISTRY, P., WELTY C., T. MCPHEARSON, T., SAUER, J., CHANG, H., 2021: The Value of Urban Flood Modeling. *Earth's Future* **9**, doi: 10.1029/2020EF001739.
- RÖTZER, T., MOSER-REISCHL, A., RAHMAN, M.A., HARTMANN, C., PAETH, H., PAULEIT, S., PRETZSCH, H., 2021: Urban tree growth and ecosystem services under extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology* **308**, doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108532.
- RÖTZER, T., RAHMAN, M.A., MOSER-REISCHL, A., PAULEIT, S., PRETZSCH, H., 2019: Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of the Total Environment* **676**, 651-664, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.235.
- SCHERER, D., 2023: Temperatur und Hitze in der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 15-25.
- STATISTISCHENS BUNDESAMT, 2023: Pressemitteilung. Siedlungs- und Verkehrsfläche wächst jeden Tag um 55 Hektar. Abruf am 17.05.2023, URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/ZahlderWoche/2023/PD23_09_p002.html.
- STRATOPOULOS, L.M.F., DUTHWEILER, S., HÄBERLE, K.H., PAULEIT, S., 2018: Effect of native habitat on the cooling ability of six nursery-grown tree species and cultivars for future roadside plantings. *Urban Forestry & Urban Greening* **30**, 37-45, doi: 10.1016/j.ufug.2018.01.011.
- VON TILS, R., 2020: Einfluss von Gebäudebegrünung auf das Innenraumklima – Simulationen mit einem mikroskaligen Modell. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover, 87 S.
- WINTERRATH, T., JUNGHÄNEL, T., LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WEIGL, E., 2023: Starkregenereignisse im urbanen Raum – Monitoring auf Basis von Messstationen und Wetterradar. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 27-37.
- ZÖLCH, T., HENZE, L., KEILHOLZ, P., PAULEIT, S., 2017: Regulating urban surface runoff through nature-based solutions – An assessment at the

micro-scale. *Environmental Research* **157**, 135-144,
doi: 10.1016/j.envres.2017.05.023.

ZÖLCH, T., MADERSPACHER, J., WAMSLER, C.,
PAULEIT, S., 2016: Using green infrastructure for
urban climate-proofing: An evaluation of heat miti-
gation measures at the micro-scale. *Urban Forestry
& Urban Greening* **20**, 305-316, doi: 10.1016/j.
ufug.2016.09.011.

Kontakt

PROF. DR. STEPHAN PAULEIT
Technische Universität München
Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschafts-
entwicklung
Emil-Ramann-Str. 6
85354 Freising
pauleit@tum.de

DR. SABRINA ERLWEIN
Technische Universität München
Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschafts-
entwicklung
Emil-Ramann-Str. 6
85354 Freising
sabrina.erylwein@stadt.nuernberg.de

DR. SIMONE LINKE
Technische Universität München
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen
und Bauen
Arcisstraße 21
80333 München
s.linke@tum.de

DR. MOHAMMAD RAHMAN
Technische Universität München
Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschafts-
entwicklung
Emil-Ramann-Str. 6
85354 Freising
ma.rahman@tum.de

DR. TERESA ZÖLCH
Landeshauptstadt München
Referat für Klima- und Umweltschutz
Bayerstr. 28a
80335 München
teresa.zoelch@muenchen.de

PROF. DR. THOMAS RÖTZER
Technische Universität München
Lehrstuhl für Waldwachstumskunde
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2
85354 Freising
thomas.roetzer@tum.de

S. EMEIS

9 Lokalklimatische Auswirkungen der urbanen Energieversorgung

Local climate effects of urban energy supply

Zusammenfassung

Städte sind Schwerpunkte des anthropogenen Energiebedarfs. Der Beitrag stellt urbane Aspekte der Energiemeteorologie und mögliche Rückwirkungen der Energienutzung auf das Stadtklima dar. Direkte solare Energie, Windkraft, Wasserkraft, Geothermie, Wärmepumpen, Biomassenutzung und der Energiebedarf für den Verkehr werden separat angesprochen. Einige Hinweise auf energieeffiziente Baumaterialien und eine energetisch angepasste Bauplanung sowie ein kurzer Ausblick beschließen den Beitrag.

Summary

Cities are hot spots of anthropogenic energy consumption. This contribution addresses urban aspects of energy meteorology and possible repercussions of energy use on the urban climate. Direct solar energy, wind power, hydro power, geothermal energy, heat pumps, biomass usage, and the energy needed to run the traffic are discussed separately. The contribution concludes with a few hints on energy-efficient building materials, energy-adapted city planning, and a short outlook.

1 Einleitung

Städte sind Schwerpunkte des anthropogenen Energiebedarfs, da hier Wohnungen, Arbeits- und Produktionsstätten sowie der dafür notwendige Transport und Verkehr konzentriert sind. Nach Daten der Vereinten Nationen (UN 2021) werden in urbanen Gebieten derzeit 60 % bis 80 % der globalen benötigten Energiemengen verbraucht. Über die bei der Energienutzung unvermeidliche Abwärme und über freigesetzte Luftbeimengungen (Schadgase, Treibhausgase und Aerosole) hat dieser Energiebedarf Rückwirkungen auf das lokale Klima und die Luftqualität. Während der Energieimport von außerhalb der Stadt das Klima und die Luftqualität am Erzeugungsort dieser Energieform belastet, hat eine in der Stadt selbst stattfindende Energieumwandlung lokale Rückwirkungen auf das Stadtklima und – über die Modifikationen lokaler Strömungssysteme, beispielsweise Flurwinde – teilweise auch auf das regionale Klima der Umgebung (KUTTLER und GROSS 2023, SEDLMEIER und TINZ 2023). Über derartige Strömungssysteme exportierte Luftbeimengungen (Aerosole, Treib-

hausgase) können auch das globale Klima mit beeinflussen. Ferner können stadtplanerische und architektonische Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs Rückwirkungen auf das Stadtklima haben (BAUMÜLLER und KATZSCHNER 2023).

Der Energiebedarf der Städte ist vielfältig. Strom-, Wärme- und Kühlungsbedarf besteht sowohl im Wohnumfeld wie in der Industrie. Das Herbeiführen von Rohstoffen und Nahrungsmitteln benötigt ebenso Energie wie der Abtransport von Produkten und Abfällen. Die Mobilität und der Kommunikationsbedarf (z. B. Mobilfunknetze) der Bewohner erfordert weitere Energiemengen.

Die Energiemeteorologie (EMEIS 2023) ist ein Zweig der Meteorologie, der mit dem Aufkommen von Wind- und Solarenergienutzung an großer Bedeutung gewonnen hat. In dem vorliegenden Artikel sollen urbane Aspekte der Energiemeteorologie und mögliche Rückwirkungen der Energienutzung auf das Stadtklima dargestellt werden.

2 Energiebedarf von Städten

Städte brauchen Energie, die von außerhalb geliefert werden muss (Strom, Gas, Wasserstoff, Treibstoffe, Tiefe Geothermie) oder die vor Ort durch Energieumwandlung erzeugt wird (Photovoltaik-Strom, solare Wärme, Abwärme von Gebäuden, Luftwärmepumpen, oberflächennahe Geothermie, kleine Windkraftanlagen etc.).

Nicht nur die Nutzung, sondern auch die Bauweise von Gebäuden beeinflussen den urbanen Energiebedarf. Hierzu gehören die passive Solarnutzung zur Heizung (z. B. große Fenster nach Süden, dunkle Südwände in höheren Breiten) und eine daran angepasste Gebäudeausrichtung. Passive Kühlung kann durch Dämmung, Dachbegrünung oder hellere Oberflächen erfolgen. Auch enge Bauweisen wie in Wüstenstädten, die die direkte Besonnung der Straßen und der unteren Stockwerke verhindern, urbanes Grün und Wasserflächen können zu einer Reduktion der städtischen Wärmeinsel und damit zu einem thermisch erträglicheren Stadtklima und zu einem geringeren Kühlbedarf beitragen.

Eine energetisch angepasste Stadtplanung geht zudem weg von einer sektoralen Stadt mit weit getrennten Wohn-, Industrie- und Erholungsvierteln, wie sie in der 1933 formulierten Charta von Athen propagiert wurde (GOLD 1998), da dies einen erhöhten Energiebedarf für Transport und Verkehr erzeugt. Angestrebt werden heutzutage die Ziele der Charta von Leipzig (ELTGES 2010), die seit Anfang dieses Jahrhunderts entwickelt wird, und die über ein Konzept der kurzen Wege die notwendigen Verkehre, und damit einen Teil der Energieverbräuche der Mobilität, zwischen Wohnen, Arbeiten und Erholung zu reduzieren versucht.

2.1 Energieimport

Bisher werden große Teile der benötigten Energien in Form von Strom (Anteil des Stroms ungefähr 20 % in privaten Haushalten und ungefähr ein Drittel in der Industrie und im Gewerbe; UBA 2022a) und weitgehend fossilen Treib- und Brennstoffen von außen in die Städte geliefert. Der Verbrauch dieser importierten Energien in der Stadt führt infolge des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik letztlich immer zur Erzeugung von Wärme, die aus den Städten wieder abgeführt werden muss. Mit der Energiewende wird angestrebt, diesen Import durch Energieeinsparung und teilweise auch durch lokale Erzeugung zu verringern, wobei aber nur die Energieeinsparung zu einer Reduktion der Abwärme führt. Für das volle Spektrum der technischen Möglichkeiten der Bereitstellung von Erneuerbaren Energien wird hier für den gesamten Beitrag auf die sehr umfangreiche und weitgehend vollständige Übersicht von KALTSCHMITT et al. (2020) verwiesen. Energieeinsparung und die Nutzung Erneuerbarer Energien reduzieren auch die Rückwirkungen von Städten auf das lokale, regionale und globale Klima und die Luftqualität. Diese Effekte sollen im Folgenden genauer dargestellt werden.

2.2 Lokale Energiebereitstellung

Lokale Energiebereitstellung kann passiv über angepasste Bebauung und aktiv über lokale Energieumwandlung erfolgen. Für die Stromerzeugung kann das solare Energiedargebot durch Photovoltaik genutzt werden, Luftbewegungen können kleinere, den städtischen Strukturen angepasste Windturbinen antreiben und die durch manche Städte fließenden Wassermassen können Wasserkraftwerke antreiben. Auch die Nutzung der Tiefen Geothermie über geothermische Kraftwerke ist für manche Regionen eine Option (FARQUHARSON et al. 2016). Für Wärme kann das solare Energiedargebot durch Strahlungsabsorption und thermische Solaranlagen angezapft werden. Wärmepumpen können der Umgebungsluft oder den oberflächennahen Bodenschichten und dem Grundwasser Wärme für lokale Heizzwecke entziehen. Größere Abwärmemengen aus industriellen Anlagen und mit Abfällen oder Biomasse betriebenen Heizkraftwerken können für zentralisierte Wärmeversorgungssysteme genutzt werden. Der Ersatz der Verbrennung importierter Brennstoffe durch lokal erzeugte erneuerbare Energien trägt neben der Reduktion von Treibhausgasen auch zur Luftreinhaltung bei, da so Abgase und Partikelemissionen aus lokalen Verbrennungsvorgängen vermieden werden.

2.2.1 Solare Energie

Photovoltaik (PV)- und Solarthermie (ST)-Module wandeln einkommende kurzwellige solare Strahlungsenergie in Strom und Wärme um, wobei PV auch den diffusen Strahlungsanteil mit nutzen kann (Wirkungsgrad kommerzieller Anlagen derzeit etwa 20 %, Forschungsanlagen bis zu 47,6 %; FRAUNHOFER 2022), während ST nur die direkte Strahlung verwenden kann (die aber mit einem Wirkungsgrad bis zu 50 %; HEIZSPARER 2022). Die Solarmodule verringern einerseits die Reflektivität der mit ihnen belegten Gebäudeoberflächen, was die Ozonbildung durch atmosphärische Photochemie durch das reduzierte Strahlungsangebot etwas dämpft (FALLMANN et al. 2016), andererseits verhindern sie starke Temperaturextreme in beide Richtungen der mit ihnen belegten Dachflächen und tragen somit neben der Strom- und Wärmeerzeugung gleichzeitig zur Verschattung und Dämmung der Gebäude bei. D'AGOSTINO et al. (2022) schätzen eine Reduktion des Kühlbedarfs schlecht gedämmter Gebäude durch die Schattenwirkung der auf das Dach montierten PV-Anlagen auf 17 %. Die Reduktion des Heizbedarfs im Winter durch PV-Anlagen ist nach dieser Quelle dahingegen nahezu vernachlässigbar. MASSON et al. (2014) berechneten die Effekte von PV- und ST-Modulen für Paris und finden einen um 12 % reduzierten Kühlbedarf im Sommer und durch Abschattung einen um 3 % erhöhten Heizbedarf im Winter. Zudem schätzen sie eine Reduktion der urbanen Wärmeinsel durch derartige Anlagen um 0,2 K am Tag und 0,3 K in der Nacht ab.

Dunkle und teilweise zusätzlich mit Glasflächen verkleidete, zur Mittagssonne hin orientierte Fassaden (DIMASSI

und DEHMANN 2012) können im Winter der höheren Breiten erhebliche passive Wärmegegewinne erzielen, die den Heizbedarf deutlich verringern. Gleichzeitig verhindern vorspringende Dächer eine unerwünschte übermäßige Besonnung dieser Fassaden im Sommer. Genauso können große Fenster mit geringen Wärmedurchgangswerten unter vorspringenden Dächern im Winter einen hohen Wärmegegewinn für die dahinterliegenden Räume generieren.

Helle Oberflächen können durch Reflektion einkommender kurzwelliger Strahlung die Aufheizung von Gebäuden und anderer Infrastrukturen und damit den Energiebedarf für Kühlung verringern. Diese sollten aber sorgsam geplant werden, um Blendwirkungen für die Bewohner zu vermeiden (LEE et al. 2013). Zudem haben vermehrte helle Oberflächen in der Stadt einen verstärkenden Einfluss auf die Photochemie (z. B. Ozonproduktion; FALLMANN et al. 2016). Mehrfach diskutiert wurden bereits weiße, oder zumindest sehr helle Dächer zur Reduktion der atmosphärischen städtischen Wärmeinsel (FALLMANN et al. 2013). In Deutschland werden sie aber vielfach durch die bestehenden Bauordnungen nicht zugelassen (EMEIS und FALLMANN (2022) zur Verzögerung der nachhaltigen Entwicklung von Städten durch Gesetze und Normen).

Grüne Dächer helfen auch bei der Reduktion der städtischen Wärmeinsel, da sie einen Teil der einkommenden kurzwelligigen Sonnenstrahlung für Verdunstungsprozesse verwenden (PAULEIT et al. 2023).

2.2.2 Windkraft

Kleinere, in die Gebäudestrukturen integrierte oder auf sie aufgesetzte Windturbinen (Leistung einige hundert bis einige tausend Watt) können der lokalen Stromerzeugung dienen, eignen sich aber nicht für kommerzielle Stromerzeugung in größerem Stil. Dabei können unterschiedlichste Bauarten zum Einsatz kommen wie Rotoren mit vertikalen Achsen, Savonius-Rotoren und ähnliches (CACE et al. 2007). Vor allem Windturbinen mit vertikalen Achsen helfen, die häufig wechselnden Windrichtungen zwischen den Gebäuden effektiv auszunutzen, da keine Nachführung der Rotoren notwendig ist. Auch Dachkanten von größeren Gebäuden können genutzt werden (Abb. 19 in TOJA-SILVA et al. 2013). Eine Übersicht findet sich zum Beispiel in STATHOPOULOS et al. (2018). Die direkten stadtklimatischen Auswirkungen auf Wind und Temperatur derartiger kleiner Windturbinen dürften relativ gering sein. Insgesamt tragen sie zu einer geringen Reduktion der innerstädtischen Windgeschwindigkeiten und zur Turbulenzerhöhung bei, da solche Windturbinen zusätzliche Rauigkeitselemente darstellen und bei Betrieb auch zusätzliche Turbulenz erzeugen.

Wind kann aber auch zur Kühlung genutzt werden und so zur Reduktion des für die Kühlung benötigten Energiebedarfs beitragen. Städte als Ganzes profitieren hierfür von Frischluftschneisen von außen in die Innenstädte. Für einzelne Gebäude wurden schon vor vielen Jahrhunderten in

den Städten der Wüstenregionen des Vorderen Orients die Windtürme (arabisch: Badgir) erfunden und gebaut, die bei geschicktem Betrieb tagsüber kühlere und angefeuchtete Luft über unterirdische, wasserführende Kanäle von unten in die Gebäude saugen (Bernoulli-Effekt), während sie nachts kühlere Außenluft von oben in die Gebäude leiten (AZAMI 2005). Diese Windtürme nutzen die natürlichen Winde ohne selbst Energie zu verbrauchen. Ähnlich wie Windturbinen stellen sie zusätzliche Rauigkeitselemente in der urbanen Grenzschicht dar, die die mittlere Windgeschwindigkeit etwas verringern. Durch die tagsüber nach oben und nachts nach außen abgeführte Wärme tragen sie zusätzlich zur Reduktion der städtischen Wärmeinsel bei.

2.2.3 Wasserkraft

Viele Städte liegen an größeren Flüssen oder an den Ozeanen. Die kinetische Energie des Wassers kann über Laufwasserkraftwerke zur Stromerzeugung genutzt werden. Derzeit sind in Deutschland ca. 5 GW Wasserkraft installiert, das sind ca. 2,5 % der gesamten installierten Leistung. Diese decken durchschnittlich 3,5 % der Energieerzeugung ab (ENERGY CHARTS 2023). Eine direkte Beeinflussung des lokalen Klimas durch diese Form der Energieumwandlung ist weitgehend vernachlässigbar. Die aufgestauten Flusswassermassen vor den Kraftwerken stellen allerdings zusätzliche Wasserflächen im urbanen Umfeld dar, was im lokalen Klima aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser und der Verdunstung von der Wasseroberfläche ausgleichend und dämpfend wirken kann. Gleichzeitig kann die Wasserstandsregulierung für das Kraftwerk das Überschwemmungsrisiko stromab verringern (DEMEKE et al. 2013).

Die ozeanischen Gezeiten sind bisher kaum zur urbanen Energieerzeugung genutzt worden, obwohl im Mittelalter an den Küsten auch Gezeitenmühlen betrieben wurden (LUCAS 2006). Das Gezeitenkraftwerk von Saint Malo in Frankreich ist hier eine große Ausnahme geblieben (ANDRE 1980). Lokalklimatische Auswirkungen von Gezeitenkraftwerken sind nicht zu erwarten. Mögliche ozeanographische Auswirkungen sind vorstellbar, hier aber nicht Gegenstand der Betrachtung.

2.2.4 Geothermie

Bei der Geothermie muss zwischen oberflächennaher Geothermie und Tiefer Geothermie unterschieden werden. Oberflächennahe Geothermie kann mittels Wärmepumpen zu Heizzwecken genutzt werden (ZHU et al. 2011). Dabei wird die obere Bodenschicht und/oder das Grundwasser etwas abgekühlt, während die Luft im Umfeld der beheizten Gebäude leicht erwärmt wird. Damit wird gleichzeitig die urbane Wärmeinsel im Boden und Grundwasser reduziert (BAYER et al. 2019), was aus biologischen und ökologischen Gründen prinzipiell positiv zu sehen ist (BLUM et al. 2021), während die atmosphärische Wärmeinsel (SCHERER 2023) gegenüber den heutigen Heizmethoden vermutlich weitgehend unverändert bleibt. Jahresarbeits-

zahlen von oberflächennaher Geothermie liegen bei ca. 5, das heißt man erhält über das Jahr hinweg gemittelt für den eingesetzten Strom die fünffache Energie in Form von Wärme (CO2ONLINE 2021).

Tiefe Geothermie kann in geothermischen Kraftwerken (FARQUHARSON et al. 2016) zur Stromerzeugung genutzt werden, die Abwärme solcher Kraftwerke kann Heizzwecken zugeführt werden. Die Wärmeentnahme aus größeren Tiefen ist geologisch und klimatisch irrelevant, während die atmosphärische Wärmeinsel verglichen mit den heutigen Heizmethoden vermutlich weitgehend unverändert bleibt, weil nur die Heizwärmequelle verändert wird. Tiefengeothermische Kraftwerke benötigen wie jedes klassische Wärmekraftwerk (Braunkohle, Kohle, Öl, Atom, Biomasse) eine Kühlung. Wird die Kühlung mit Wasser und zugehörigen Kühltürmen realisiert, so geben diese Wasserdampf und Wärme an die Luft ab. Diese Abgabe modifiziert das lokale Klima um das Kraftwerk herum in derselben Weise wie klassische Wärmekraftwerke (BOWEN 1989). Zu nennen sind hier vermehrte Wolkenbildung und teilweise sogar leichter Niederschlag im Lee solcher Anlagen (LIECHTI 2004).

2.2.5 Luftwärmepumpen

Luftwärmepumpen dienen bereits heute bei Neubauten als standardisierte Heizeinrichtungen. Die außerhalb des Gebäudes aufgestellten Anlagen werden in der Regel elektrisch betrieben und entziehen der Luft Wärme, die dann dem Gebäude für Warmwasserbereitung und Heizzwecke zur Verfügung gestellt werden. Obwohl Luftwärmepumpen nicht ganz so effektiv sind wie die zuvor erwähnten Wärmepumpen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie (Jahresarbeitszahl von Luftwärmepumpen liegt nur bei ca. 3; CO2ONLINE 2021), werden sie diesen jedoch vorgezogen, da der Installationsaufwand wesentlich geringer ist. Eine Übersicht über die Technik und einzelne Ausführungen findet sich in STAFFELL et al. (2012). Letztlich wird diese Wärme durch Wärmeleitung durch die Außenhülle der Gebäude und durch Lüftungsvorgänge wieder abgegeben. Der lokalklimatische Einfluss von Luftwärmepumpen dürfte somit nahezu Null sein, da die Wärme innerhalb der urbanen Grenzschicht im Wesentlichen nur umverteilt wird. Allerdings profitiert die Luftqualität deutlich, da durch sie lokale Verbrennungsvorgänge wegfallen (CARELLA und D'ORAZIO 2021).

2.2.6 Biomasse/Holzheizungen

Biomasse kann zum Heizen benutzt werden. Allerdings kann die dafür notwendige Biomasse nur zu einem sehr kleinen Teil innerhalb der Städte aufwachsen. Aus Gründen des Klimaschutzes sollte Holz und andere Biomasse auch eher einer langfristigen Nutzung (Baumaterial, Dämmmaterial etc.) zugeführt werden, da somit sogar Kohlendioxid aus dem atmosphärischen Kreislauf entzogen wird und ein Beitrag zur Treibhausgasreduktion geleistet wird (AMIRI et al. 2020).

Biomasse/Holzheizungen erfordern einen dem Heizölverbrauch analogen Transportbedarf, da das Brennmaterial überwiegend von außen in die Städte gebracht werden muss. Die atmosphärische Wärmeinsel bleibt gegenüber den heutigen Heizmethoden vermutlich weitgehend unverändert. Allerdings erfordert die Aerosolproduktion bei der Verbrennung von Holz und anderer Biomasse (MASSIMI et al. 2020) eine sorgfältige Abgasreinigung, damit die Staubbelastung der Luft nicht zunimmt und negative Auswirkungen auf die Luftqualität vermieden werden (WURZLER et al. 2023).

2.2.7 Verkehr

Mobilität und Transport werden zunehmend auf nicht-fossile Energiequellen umgestellt werden. Die Fahrzeuge werden vermutlich zukünftig elektrisch, das heißt entweder mit batterieelektrischen Antrieben oder mit Brennstoffzellen betrieben werden. Der für batterieelektrische Antriebe notwendige Strom für die gesamte jährliche deutsche Verkehrsleistung von gut 100 TWh (ungefähr 20 % des derzeitigen gesamten deutschen Strombedarfs von ungefähr 500 TWh bei gleicher Fahrleistung wie 2020 (683 Mrd. km) und 15 kWh pro 100 km Durchschnittsverbrauch; BMVI 2022) wird nur zu einem kleinen Teil lokal erzeugt werden können und muss daher überwiegend von außen importiert werden. Wasserstoff für Brennstoffzellen wird industriell ebenfalls außerhalb der Städte erzeugt werden müssen, idealerweise aus erneuerbaren Energien (im letzteren Falle spricht man von grünem Wasserstoff; KAKOULAKI et al. 2021). Hierfür kommt zukünftig entweder die Elektrolyse mit regenerativ erzeugtem Strom oder vielleicht auch Hydrolyse aus Biomasse oder Abfällen in Frage (KRETSCHMAR und HAUSCHILD 2021). Beides hat im Wesentlichen lokal- und regionalklimatische Auswirkungen im Umland. In der Stadt fällt bei batterieelektrischem Betrieb teilweise die Abwärme aus der Verbrennung fossiler Treibstoffe weg.

Wichtiger ist, dass mit einer Umstellung des Antriebs im Verkehr auf elektrische Verfahren vor allem die Stickstoffoxid-Emissionen der Verbrennungsmotoren der Fahrzeuge ganz wegfallen und somit ein wesentlicher Beitrag zur urbanen Luftreinhaltung geleistet wird. Betrug der Verkehrsanteil an den Stickstoffemissionen um 1990 noch ca. 50 % (ca. 1,4 Millionen Tonnen) der gesamtdeutschen Stickstoffemissionen, so lag er 2020 bei 40 % (ca. 0,4 Millionen Tonnen; UBA 2022b). Dieser Wegfall eines Teils der schädlichen Emissionen ist wichtig, da mit parallelen Maßnahmen auch die städtische Wärmeinsel reduziert werden soll. Mit einer reduzierten Wärmeinsel verringern sich aber auch die sekundären, thermisch angetriebenen Zirkulationssysteme der Städte (Flurwinde), die die Abgase bisher aus den städtischen Gebieten abführten (FALLMANN et al. 2016, GROSS 2019). Die Aerosolbelastung aus Reifen- und Bremsabrieb bleibt allerdings weitgehend unverändert, sodass hierdurch keine Entlastung beim Feinstaub zu erwarten ist.

2.3 Energieeffiziente Baumaterialien

Energie, die gar nicht erst bereitgestellt werden muss, ist stadtklimatisch noch günstiger als jede Form Erneuerbarer Energien wie sie im Abschnitt 2.2 beschrieben wurden.

Zusätzlich zu den in Abschnitt 2.2.1 genannten Maßnahmen reduzieren gut gedämmte Wände und begrünte Dächer den Heiz- und Kühlungsenergiebedarf von Gebäuden. Besondere Baustoffe können hier zusätzlich helfen. Materialien wie Salze oder Paraffine (PCMs, *phase changing materials*), deren Phase sich temperaturabhängig ändert, können in die Wände integriert werden. Der Schmelzpunkt dieser PCMs kann an die Anforderungen angepasst werden. PCMs halten diese gewählte Temperatur bis jeweils der gesamte Phasenwechsellvorgang abgeschlossen ist und helfen somit sowohl Überwärmungen als auch Unterkühlungen im Gebäudeinneren zu verhindern (GILLOTT et al. 2010).

2.4 Energetisch angepasste Stadtplanung

Eine energetisch angepasste Stadtplanung kann zudem für einen verringerten Energieverbrauch hilfreich sein. Eine Möglichkeit bietet die räumliche Anordnung der verschiedenen Funktionen in einer Stadt. Derzeit geht man weg von einer sektoralen Stadt mit relativ strikt getrennten Wohn-, Industrie- und Erholungsvierteln, wie sie in der 1933 formulierten Charta von Athen propagiert wurde (GOLD 1998), da dies heutzutage einen erhöhten Energiebedarf für Transport und Verkehr erzeugt. Angestrebt werden nunmehr die Ziele der Charta von Leipzig (ELTGES 2010), die seit Anfang dieses Jahrhunderts entwickelt wird, und die über ein Konzept der kurzen Wege die notwendigen Verkehre zwischen Wohnen, Arbeiten und Erholung zu reduzieren versucht. Hierbei hilft, dass sowohl die Lärm- wie auch die Schadstoffemissionen von Industrie und verarbeitendem Gewerbe in den letzten Jahrzehnten deutlich reduziert wurden. Das ermöglicht die größere räumliche Nähe von Industriegebieten und Wohngebieten.

Die Ausrichtung der Gebäude zur Sonne spielt auch eine erhebliche Rolle für den Energiebedarf der Gebäude. Dies wurde erstmals 1917 von Tony Garnier für die *Cité Industrielle* formuliert (RUDLIN und FALK 2009). Garnier zufolge sollten Wohnquartiere in ost-west ausgerichteten Blöcken angeordnet werden, die allen Gebäuden eine ausreichende Südfassade ermöglicht. Enge Straßen dazwischen sollten keine Straßenbäume aufweisen, breitere Straßen dagegen sollten Bäume nur auf ihrer jeweiligen Südseite haben, um Beschattungen der Gebäude zu vermeiden. Dieses Beispiel von 1917 ist neben KASSNER (1910) einer der ersten Versuche eines klimaangepassten Bauens (KUTTLER et al. 2023), auch wenn damals die gesundheitsfördernden Aspekte der Sonnenstrahlung im Vordergrund standen (unter anderem die Rachitis-Prophylaxe) und nicht die Energieeffizienz. Der Paradig-

menwechsel durch den Klimawandel wird hier deutlich: während früher die Besonnung im Vordergrund stand, ist es heutzutage die Beschattung in den wärmeren Jahreszeiten.

Weitere Aspekte einer energieeffizienten klimaangepassten Stadtplanung können den typischen Merkmalen heutiger Städte in heißen Klimaten entnommen werden. Hierzu zählt beispielsweise eine sehr kompakte Bauweise, die verhindert, dass die Sonnenstrahlung bis zum Straßenniveau und den untersten Stockwerken der Gebäude vordringen kann. So wird eine strahlungsbedingte Aufheizung der unteren Gebäudeteile weitgehend vermieden (PEARLMUTTER und BERLINER 1999).

3 Ausblick

Die Fragestellungen für das Stadtklima (Wärme und Luftqualität gleichermaßen) wandeln sich mit der Energiegewende. Bekannte Probleme verringern sich teilweise oder verschieben sich (Tabelle 9-1). Allerdings tauchen dafür neue Fragestellungen und Herausforderungen auf.

Der Verbrauch von Treibstoffen (außer reinem Wasserstoff in Brennstoffzellen) in der Stadt für Wärme und Transport sollte reduziert werden, da die bei der Verbrennung entstehenden Abgase schlechter abziehen, wenn mit der Reduktion exothermer Energiebereitstellung gleichzeitig die Intensität der urbanen Wärmeinsel reduziert wird (FALLMANN et al. 2016). Das heißt, die Freihaltung von Frischluftschneisen und Durchlüftungszonen bekommt dann eine noch größere Bedeutung als in der Vergangenheit, da das thermisch angetriebene sekundäre Strömungssystem (Aufwinde über der warmen Stadt und kompensierende Flurwinde), welches durch die Stadt selbst initiiert wird und das bisher bei der Luftreinhaltung sehr hilfreich war, bei einer abnehmenden Intensität der Wärmeinsel insgesamt schwächer werden wird. Mit der Reduktion der Flurwinde und mit der Verbesserung der Luftqualität durch reduzierte Verbrennungsvorgänge wird der Schadstoffexport aus der Stadt heraus reduziert. Damit wird die Rückwirkung der Städte auf das regionale und globale Klimasystem verringert.

Der Wandel in diesen Fragestellungen erfordert eine geänderte Architektur und Stadtplanung. Allerdings hat die bisherige Erfahrung gezeigt, dass ein solcher Wandel nur sehr langsam vorangeht (FALLMANN und EMEIS 2020). Häufig geht es nicht über einzelne Pilotprojekte hinaus. Ein Hinderungsgrund für einen rascheren Wandel sind die sehr stark regulierten Verwaltungs- und Planungsvorgänge in den Kommunen, die sich an einer Vielzahl von Regeln und Vorschriften orientieren müssen (EMEIS und FALLMANN 2022). Die Fortschreibung dieser Regeln und Vorschriften unterliegt aber wiederum einer eigenen Dynamik, die aus Gründen der Qualitätssicherung nur schwer beschleunigt werden kann (KRECHMER 2004).

Tabelle 9-1: Auswirkung der jeweiligen innerstädtischen Energieversorgungen (oben durch Erneuerbare Energien, unten mittels fossiler Energieträger) auf die städtische Wärmeinsel, die urbane Luftfeuchte, die urbane Luftchemie und auf den Aerosolgehalt der Luft (k. E. = kein Einfluss; THG = Treibhausgase). Die Luftwärmepumpe ist hier nicht aufgeführt, da sie keinen Einfluss ausübt.

Energiesystem	Wärmeinsel	Luftfeuchte	Luftchemie	Aerosole
Erneuerbare Energien				
Photovoltaik	leichte Verringerung durch Energieabsorption	k. E. bei Dachanlagen, weniger Verdunstung bei Freiflächenanlagen	leicht verringerte Photochemie durch Absorption kurzwelliger Strahlung	k. E.
Solarthermie	leichte Verringerung durch Energieabsorption (etwas mehr als bei PV)	k. E.	leicht verringerte Photochemie durch Absorption kurzwelliger Strahlung	k. E.
Windkraft	leichte Verringerung durch erhöhte Turbulenz	Umverteilung durch erhöhte Turbulenz	k. E.	k. E.
Wasserkraft	k. E.	erhöhte Verdunstung über Stauseen	k. E.	k. E.
Biomasse	Erhöhung durch Abwärme	Wasserdampf aus nicht völlig trockenen Brennstoffen	Emission von Schadgasen und THG aus nicht-fossilem Kohlenstoff	Ruß, vor allem bei Holzheizungen
Oberflächennahe Geothermie	Erhöhung durch Abwärme	k. E.	k. E.	k. E.
Tiefe Geothermie	Erhöhung durch Abwärme	Erhöhung, wenn Wasserkühlung für thermische Kraftwerke	k. E.	k. E.
Verkehr (Batterie)	Erhöhung durch Abwärme	k. E.	k. E.	nur leicht verringert, Bremsen- und Reifenabrieb bleibt
Verkehr (Brennstoffzelle)	Erhöhung durch Abwärme	Erhöhung durch Wasserdampf im Abgas (mehr als bei fossilen Brennstoffen)	Emission von Wasserdampf	nur leicht verringert, Bremsen- und Reifenabrieb bleibt
Fossile Energieträger				
Ölheizung	Erhöhung durch Abwärme	leichte Erhöhung durch Wasserdampf im Abgas	Emission von Schadgasen und THG	Ruß
Gasheizung	Erhöhung durch Abwärme	leichte Erhöhung durch Wasserdampf im Abgas	Emission von Schadgasen und THG	k. E.
Verkehr	Erhöhung durch Abwärme	leichte Erhöhung durch Wasserdampf im Abgas	Emission von Schadgasen und THG	Ruß, Bremsen- und Reifenabrieb

Literatur

D'AGOSTINO, D., PARKER, D., MELIÀ, P., DOTELLI, G., 2022: Optimizing photovoltaic electric generation and roof insulation in existing residential buildings. *Energy and Buildings* **255**, 111652.

AMIRI, A., OTTELIN, J., SORVARI, J., JUNNILA, S., 2020: Cities as carbon sinks – classification of wooden buildings. *Environmental Research Letters* **15**, 094076.

ANDRE, H., 1980: Cheap electricity from French tides: The sea has demonstrated both friendly and adverse effects during the 14-year history of the Saint Malo plant. *IEEE spectrum* **17**, 54-57.

AZAMI, A., 2005. Badgir in traditional Iranian architecture. In: International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”, Mai 2005, Santorini, Griechenland.

BAUMÜLLER, J., KATZSCHNER, L., 2023: Stadtklima und Klimaanpassung in der städtebaulichen Planung. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 115-123.

BAYER, P., ATTARD, G., BLUM, P., MENBERG, K., 2019. The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **106**, 17-30.

BLUM, P., MENBERG, K., KOCH, F., BENZ, S. A., TISSEN, C., HEMMERLE, H., BAYER, P., 2021: Is thermal use of groundwater a pollution? *Journal of Contaminant Hydrology* **239**, 103791.

BMVI, 2022: Verkehr in Zahlen 2021/2022. 50. Jahrgang. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Abruf am 20.04.2023, URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2021-2022-pdf.pdf?__blob=publicationFile.

BOWEN, R., 1989: Environmental impact. In: Geothermal Resources. *Springer*, Dordrecht, 322-360.

CACE, J., TER HORST, E., SYNGELLAKIS, K., NIEL, M., CLEMENT, P., HEPPENER, R., PEIRANO, E., 2007: Urban wind turbines. Guidelines for small wind turbines in the built environment. Abruf am 20.04.2023, URL: http://www.urbanwind.net/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf.

CARELLA, A., D'ORAZIO, A., 2021: The heat pumps for better urban air quality. *Sustainable Cities and Society* **75**, 103314.

CO2ONLINE, 2021: Wärmepumpen-Vergleich: Heizen mit Luft, Wasser oder Erdwärme? Abruf am 20.04.2023, URL: <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/waermepumpe/waermepumpe-arten-im-vergleich/#c156131>.

DEMEKE, T.A., MARENCE, M., MYNETT, A.E., 2013: Evaporation from reservoirs and the hydropower water footprint. International Conference and Exhibition on Water Storage and Hydropower Development for Africa, Addis Abeba, Äthopien, 16-18 April 2013.

DIMASSI, N., DEHMANI, L., 2012: Thermal efficiency of a solar wall in Tunisia. *ISRN Renewable Energy* **2012**, 1-8.

ELTGES, M., 2010. Leipzig charter on sustainable European cities – a work in progress. *European Spatial Research And Policy* **16**, 63-78.

EMEIS, S., 2023: Windenergie-Meteorologie. *Springer Vieweg*, 270 S.

EMEIS, S., J. FALLMANN, J., 2022: Unsatisfying Transfer of Climate Research to Urban Planning: The Regulatory Trap in the Triple Helix. *Triple Helix Journal* **9**, 275-295, doi: 10.1163/21971927-bja10035.

ENERGY CHARTS, 2023: Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland 2021. Kreisdiagramme zur Stromerzeugung. Website des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, Abruf am 20.04.2023, URL: https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&interval=year&year=2021.

FALLMANN, J., EMEIS, S., 2020: How to Bring Urban and Global Climate Studies together with Urban Planning and Architecture? *Developments in the Built Environment* **4**, doi: 10.1016/j.dibe.2020.100023.

FALLMANN, J., EMEIS, S., SUPPAN, P., 2013: Mitigation of urban heat stress – a modelling case study for the area of Stuttgart. *Die Erde – Journal of the Geographical Society of Berlin* **144**, 202-216.

FALLMANN, J., FORKEL, R., EMEIS, S., 2016: Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality. *Atmospheric Environment* **125**, 199-211, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.10.094.

FARQUHARSON, N., SCHUBERT, A., STEINER, U., 2016: Geothermal Energy in Munich (and Beyond) – A Geothermal City Case Study. *GRC Transactions* **40**, 189-196.

FRAUNHOFER, 2022: Presseinformation Nr. 13 vom 30. Mai 2022. Website des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, Abruf am 20.04.2023, URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/fraunhofer-ise-entwickelt-effizienteste-solarzelle-der-welt-mit-47-komma-6-prozent-wirkungsgrad.html>.

GILLOTT, M., RODRIGUES, L.T., SPATARU, C., 2010: Low-carbon housing design informed by research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability* **163**, 77-87.

GOLD, J.R., 1998. Creating the charter of Athens: CIAM and the functional city, 1933-43. *Town Planning Review* **69**, 225-247.

GROSS, G., 2019: On the self-ventilation of an urban heat island. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 87-92.

HEIZSPARER, 2022: Solarthermie Leistung. Website der Anondi GmbH, Abruf am 20.04.2023, URL: <https://www.heizsparer.de/solar/solarthermie/solarthermie-leistung>.

KAKOULAKI, G., KOUGIAS, I., TAYLOR, N., DOLCI, F., MOYA, J., JÄGER-WALDAU, A., 2021: Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management* **228**, 113649.

KALTSCHMITT, M., STREICHER, W., WIESE, A. (Hrsg.), 2020: Erneuerbare Energien. 6. Auflage. *Springer Vieweg*, 1249 S.

KASSNER, C., 1910: Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaues. Städtebauliche Vorträge aus dem

- Seminar für Städtebau an der Königlichen Technischen Hochschule zu Berlin, Band III, Heft VI. BRIX, J. und GENZMER, F. (Hrsg.), Berlin, Ernst & Sohn.
- KRECHMER, K., 2004: Standardization and innovation policies in the information age. *International Journal of IT Standards and Standardization Research (IJITSR)* **2**, 49-60.
- KRETZSCHMAR, J., HAUSCHILD, S., 2021: Wasserstoff aus Biomasse – Eine Einordnung. Deutsches Biomasseforschungszentrum (Hrsg.), Abruf am 20.04.2023, URL: https://wasserstoffwirtschaft.sh/file/wasserstoff-aus-biomasse-eine-einordnung_kretzschmar_dbfz.pdf.
- KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.
- KUTTLER, W., HOLLOSI, B., GUBLER, M., 2023: Stadtklimatologie im Wandel der Zeit – Einblicke aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 125-141.
- LEE, H., HOLST, J., MAYER, H., 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*, 312572.
- LIECHTI, O., 2004: Industrieschnee: Das Nebelphänomen Schneegriesel. *Strasse und Verkehr* **90**, 19-22.
- LUCAS, A., 2006: Tide Mills and Windmills in the Middle Ages. In: Wind, Water, Work. 85-127. Brill, Leiden, doi: 10.1163/9789047417224_009.
- MASSIMI, L., SIMONETTI, G., BUIARELLI, F., DI FILIPPO, P., POMATA, D., RICCARDI, C., RISTORINI, M., ASTOLFI, M.L., CANEPARI, S., 2020: Spatial distribution of levoglucosan and alternative biomass burning tracers in atmospheric aerosols, in an urban and industrial hot-spot of Central Italy. *Atmospheric Research* **239**.
- MASSON, V., BONHOMME, M., SALAGNAC, J.L., BRIOTTET, X., LEMONSU, A., 2014: Solar panels reduce both global warming and urban heat island. *Frontiers in Environmental Science* **2**, 10 S.
- PAULEIT, S., ERLWEIN, S., LINKE, S., RAHMAN, M., ZÖLCH, T., RÖTZNER, T., 2023: Grün-blaue Infrastruktur für die Klimawandelanpassung der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 79-88.
- PEARLMUTTER, D., BERLINER, P., 1999: Urban Microclimate in the Desert: Planning for Outdoor Comfort under Arid Conditions. In: Desert Regions. PORTNOV, B.A., HARE, A.P. (Hrsg.), Springer, Berlin, Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-642-60171-2_16.
- RUDLIN, D., FALK, N., 2009: Sustainable Urban Neighbourhood. 2. Auflage. Routledge, 338 S.
- SCHERER, D., 2023: Temperatur und Hitze in der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 15-25.
- SEDLMEIER, K., TINZ, B., 2023: Wind in der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 39-49.
- STAFFELL, I., BRETT, D., BRANDON, N., HAWKES, A., 2012: A review of domestic heat pumps. *Energy & Environmental Science* **5**, 9291-9306.
- STATHOPOULOS, T., ALRAWASHDEH, H., AL-QURAN, A., BLOCKEN, B., DILIMULATI, A., PARASCHIVOIU, M., PILAY, P., 2018: Urban wind energy: Some views on potential and challenges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **179**, 146-157.
- TOJA-SILVA, F., COLMENAR-SANTOS, A., CASTRO-GIL, M., 2013: Urban wind energy exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions – Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **24**, 364-378.
- UBA, 2022a: Endenergieverbrauch nach Sektoren. Abbildung des Umweltbundesamtes (Hrsg.), Abruf am 15.06.2023, URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/4_abb_eev-sektoren-et_2022-12-16.pdf.
- UBA, 2022b: Stickstoffoxid (NO_x, gerechnet als NO₂)-Emissionen nach Quellkategorien. Abbildung des Umweltbundesamtes (Hrsg.), Abruf am 20.04.2023, URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_stickstoffoxid-emi_2022.pdf.
- UN, 2021: Sustainable Development Goals. Goal 11: Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable. Website der United Nations (UN), Abruf am 20.04.2023, URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities>.
- WURZLER, S., HEBBINGHAUS, H., ROGALLA, L., BECK, N., KLOSTERKÖTHER, A., GEIGER, J., 2023: Entwicklung der Luftqualität in der Metropolregion Rhein-Ruhr. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 51-60.
- ZHU, K., BLUM, P., FERGUSON, G., BALKE, K.-D., BAYER, P., 2011: The geothermal potential of urban heat islands. *Environmental Research Letters* **6**, 19501.

Kontakt

PROF. DR. STEFAN EMEIS
 ehem. Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Institut für Meteorologie und Klimaforschung
 Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU)
 Kreuzackbahnstr. 19
 82467 Garmisch-Partenkirchen
 sastc.emeis@t-online.de

TH. FOKEN, E. PARLOW, G. GROSS, B. LEITL

10 Untersuchungsmethoden zum Stadtklima

Investigation methods for urban climate

Zusammenfassung

Für die Bearbeitung stadtklimatischer Fragestellungen stehen mehrere Untersuchungsmethoden zur Verfügung. Neben direkten und indirekten Messungen mit verschiedensten Beobachtungssystemen können auch Modelle herangezogen werden. Diese unterteilen sich in physikalische Modelle (z. B. Windkanal) und in numerische Simulationsmodelle. Jede der Untersuchungsmethoden hat ganz spezifische Stärken, aber auch Schwächen. Aus diesem Grunde erscheint es vorteilhaft, Aussagen zum Stadtklima aus der Zusammenschau der sehr unterschiedlichen Ergebnisse abzuleiten.

Summary

Various methods are available to discuss and address issues in the field of urban climate. Besides observations and measurements with various in-situ and remote sensing monitoring systems, also models are available. These models can be classified into physical models (e.g. wind tunnel) and numerical simulation models. However, each method has its specific strengths but also weaknesses. Therefore, it seems appropriate and beneficial to derive results and statements regarding urban climate from aggregated results of the various methods.

1 Einleitung

Für die Beschreibung der Verteilung der verschiedenen meteorologischen Parameter in einer komplexen Stadtatmosphäre stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Mithilfe von Beobachtungen vor Ort ist eine genaue Analyse des Ist-Zustandes möglich. Diese Naturdaten beinhalten alle komplexen Wechselwirkungen mit Phänomenen auf sehr unterschiedlichen Skalen. Bei der Auswertung der Beobachtungen müssen beispielsweise Fragen hinsichtlich der räumlichen Repräsentanz geklärt werden; eine Diskussion hinsichtlich der Auswirkungen von Klimawandel und Bebauungsänderungen auf die Stadtatmosphäre ist dagegen auf Basis der Beobachtungsdaten kaum möglich.

Physikalische Modelle, darunter Windkanaluntersuchungen anhand eines verkleinerten Modells, stellen ein weiteres Werkzeug für die Untersuchung stadtklimatischer Verhältnisse dar. Dabei sind sehr detaillierte Messungen im Hinblick auf die Gewinnung volumenfüllender Informationen möglich. Insbesondere können aber auch die Auswirkungen von geplanten Nutzungs- und Bebauungsänderungen studiert werden. Windkanaluntersuchungen werden in der Regel für eine thermisch neutral geschichtete Atmosphäre durchgeführt, da eine veränderliche thermische Schichtung im Tagesgang nur schwerlich zu realisieren ist.

Schließlich stehen noch numerische Simulationsmodelle für Stadtklimauntersuchungen zur Verfügung. Dabei können konsistente, volumenfüllende meteorologische Felder für sehr unterschiedliche Szenarien (Ist-Zustand, Plan-Zustand, Klimawandel) berechnet werden. Aufgrund der diskreten Darstellung der Variablen auf einem numerischen Gitter hängen die Ergebnisse eines solchen Modells allerdings sehr stark von der gewählten Maschenweite und der Art und Weise der Beschreibung von nicht auflösbaren Strukturen und Prozessen (Parametrisierung) ab.

2 Messungen

2.1 Grundlagen

Messungen in städtischen Gebieten müssen generell als Herausforderung betrachtet werden. Da wetterdienstliche Messungen auf eine möglichst repräsentative Aussage ausgelegt sind, befinden sich diese meist in räumlich homogenen und damit in eher ländlich geprägten Gebieten, für die es hinsichtlich Geräteauswahl und Standortbedingungen klar definierte Vorgaben gibt (WMO 2018). Städtische Messungen sind demgegenüber stark objektbezogen und sollten trotzdem für eine bestimmte städtische Struktur repräsentativ sein. Die Herausforderung besteht nun darin,

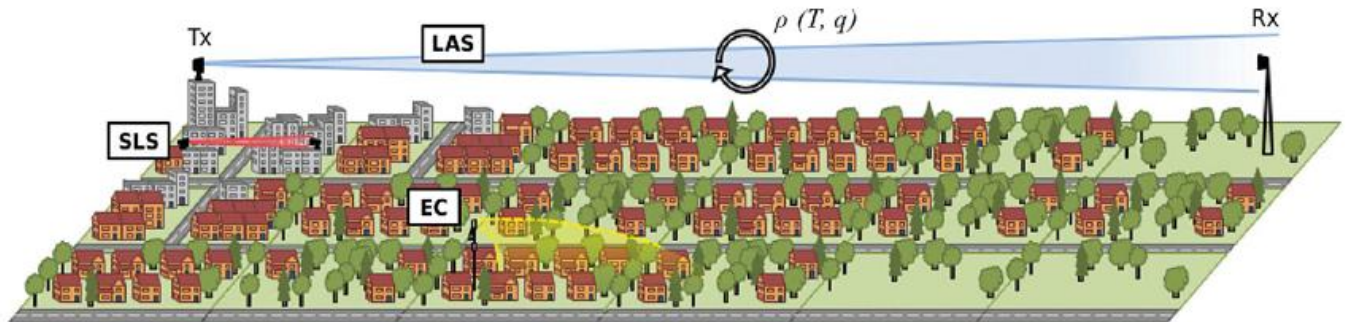


Abbildung 10-1: Messungen oberhalb von Gebäuden und Bäumen (*Urban Canopy Layer*, UCL) mittels Eddy-Kovarianz (EC)- und Scintillometertechnik (*Large Aperture Scintillometer*, LAS; *Surface Layer Scintillometer*, SLS), siehe Abschnitt 2.2 (aus WARD 2017, mit freundlicher Genehmigung von OP Publishing Ltd.).

sowohl den optimalen Messort aus Kenntnis der Feldverteilung meteorologischer Elemente zu bestimmen als auch das anzuwendende Messprinzip oder einzusetzende Messgerät festzulegen. Dies erfordert Sachkenntnis, Erfahrungen, Kompromisse (FOKEN und MÜLLER 2020) aber auch gegebenenfalls den vorherigen Einsatz von Modell- und Windkanalstudien für ein optimales Messkonzept. Es gibt inzwischen eine Vielzahl von Publikationen, in denen diese Prinzipien ausgearbeitet worden sind. Aktuelle Publikationen mit entsprechenden Aussagen stammen von GRIMMOND und WARD (2021), SCHLÜNZEN et al. (2022), beziehungsweise sind Bestandteil der Monographie von OKE et al. (2017).

Die städtische Grenzschicht ist in KUTTLER und GROSS (2023) umfassend beschrieben. Typischerweise werden die Messungen in der *Urban Canopy Layer* (UCL) durchgeführt, in der sich sowohl die Vegetation als auch die Gebäude befinden. Die Schwierigkeit bei derartigen Messungen ist die Festlegung der Messhöhe und der Rauigkeit der Unterlage. Beides wird gebraucht, um beispielsweise die thermische Stabilität der Atmosphäre und den Einflussbereich der Messungen bestimmen zu können. Für die Festlegung der Messhöhe ist die Verschiebungshöhe notwendig, in der das gedachte Windprofil den Wert 0 m s^{-1} annimmt. Bei niedrigen Pflanzenbeständen ist der Wert relativ einfach anzugeben, denn mit recht guter Genauigkeit kann dieser auf zwei Drittel der Bestandshöhe angesetzt werden. In der UCL, vor allem wenn die Messungen innerhalb der UCL erfolgen, ist dieser Ansatz untauglich. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, nach denen die Verschiebungshöhe aus der Morphographie der Bebauung ermittelt werden kann (Überblick in FOKEN 2016). Man kann diese Schwierigkeit umgehen, indem man aus Messungen der Schubspannungsgeschwindigkeit und des fühlbaren Wärmestroms (Eddy-Kovarianz-Methode; MAUDER et al. 2021) einen lokalen Stabilitätsparameter bestimmt. Recht präzise ist eine Bestimmung für Impuls- und Wärmeflussmessungen oberhalb der UCL möglich, wenn gleichzeitig Wind- und Temperaturprofile gemessen werden (KANDA et al. 2002). Die Rauigkeitshöhe entnimmt man entsprechenden Tabellen oder ermittelt sie aus der Standardabweichung der Streuung der vertikalen Windkomponente mit entsprechenden Ansätzen (FOKEN 2016, OKE et al. 2017). Die beiden

letzten Verfahren sind dann auch für den jeweiligen Messstandort gültig. Für Messungen oberhalb der UCL ist zu beachten, dass in der Rauigkeitsschicht mit der mehrfachen Höhe der UCL durch die Reibung die Gradienten von Wind und Skalaren unmittelbar über der UCL besonders groß sind, darüber aber abnehmen trotz verstärkter Austauschprozesse. Dies ist bei der Installation von Messsystemen aber auch bei der Interpretation von Daten zu beachten (THEEUWES et al. 2019).

Messungen von Skalaren sind generell stark vom umgebenden Windfeld abhängig, durch welches Eigenschaften aber auch Beimengungen advektiert werden. Man kennt zwar den exakten Messwert an einem bestimmten Ort, kann ihn aber kaum einem Quellgebiet zuordnen. Für die Bestimmung der Impulsflüsse und Flüsse von Skalaren lässt sich das Quellgebiet relativ einfach mittels Footprint-Modellen (LECLERC und FOKEN 2014) ermitteln, die prinzipiell auch für Skalare angewandt werden können, aber zu deutlich größeren Quellgebieten führen. Für die Ermittlung des Footprints sind neben der Windgeschwindigkeit und der atmosphärischen Stabilität die Kenntnis der Rauigkeitslänge und der Verschiebungshöhe notwendig, wobei letztere einen maßgeblichen Einfluss auf die Größe des bestimmten Quellgebietes hat (OLIVEIRA et al. 2022). Allerdings sind auf diesen Eingangsgrößen basierende einfache Modelle für die UCL nur bedingt anwendbar. Man kann mit deutlich höherem Aufwand mit auf der Large-Eddy-Simulation beruhenden Modellen den Footprint bestimmen (AUVINEN et al. 2017). Für die Messung turbulenter Flüsse nach der Eddy-Kovarianz-Methode (EC) ist in Abbildung 10-1 der Footprintbereich eingezeichnet. Dieser ändert sich in Abhängigkeit von Stabilität und Windgeschwindigkeit, sodass sich nicht nur der Messwert zeitlich ändert, sondern auch der räumliche Bereich, der durch die Messungen abgedeckt wird, was bei den generell sehr heterogenen städtischen Strukturen einen deutlichen Einfluss auf den Messwert haben kann.

2.2 Typische Messtechniken

Prinzipiell kommen bei Messungen in der Stadtklimatologie alle üblichen meteorologischen Messtechniken zur Anwendung. Der technische Fortschritt hat dazu geführt, dass

Tabelle 10-1: In-situ-Messtechniken zur Anwendung in der Stadtklimatologie (Auswahl aus FOKEN 2021).

Messgröße	Messprinzip	Anforderungen
Lufttemperatur	Widerstandsthermometer	Strahlungsschutz unbedingt erforderlich, möglichst belüftet
Luftfeuchte	Kapazitiver Sensor	Strahlungsschutz unbedingt erforderlich, möglichst belüftet
Luftdruck	Piezoelektrische Sensoren	Möglichst in Innenräumen aufstellen
Niederschlag	Kippwaage oder Wägeprinzip	Spezielle Standortanforderungen notwendig (WMO 2018)
Windgeschwindigkeit und Windrichtung	Schalensternanemometer und Windfahne, Ultraschallanemometer	Spezielle Standortanforderungen notwendig (WMO 2018)
Kurzwellige Strahlung (solar)	Pyranometer, Photodioden	Ungestörter oberer Halbraum, bei aufwärtsgerichteter Strahlung definierte Unterlage
Langwellige Strahlung (terrestrisch)	Pyrgeometer, Bolometer	Ungestörter oberer Halbraum, bei aufwärtsgerichteter Strahlung definierte Unterlage
Bodentemperatur	Widerstandsthermometer	Einbau möglichst in den ungestörten Boden, z. T. dicht unter Oberfläche
Bodenfeuchte	Time-Domain-Reflectometry (TDR-Sensor)	Einbau möglichst in den ungestörten Boden, z. T. dicht unter Oberfläche
Höhe der Stadtgrenzschicht	Ceilometer (Lidar)	-
Vertikales Windprofil	Doppler-Lidar	-
	Doppler-Sodar	Eingeschränkte Anwendung wegen Lärmbelästigung
Vertikales Temperaturprofil	Doppler-Sodar – RASS	Eingeschränkte Anwendung wegen Lärmbelästigung
	Mikrowellen Radiometer	-

einige Techniken besonders zuverlässige Daten liefern oder auch preisgünstig zu erwerben sind. Tabelle 10-1 enthält die bevorzugten in-situ und bodengestützten Fernerkundungsmesstechniken. Diese Messungen lassen sich sowohl horizontal vornehmen als auch an Masten zur Bestimmung vertikaler Profile anordnen (Abb. 10-2a). Die in der Tabelle angegebenen indirekten Messtechniken dienen ebenfalls vorwiegend der Bestimmung vertikaler Profile; mittels scannender Systeme lassen sich größere Volumina abtasten.

Von besonderem Interesse sind in einer Stadt die Energieflüsse (GOLDBACH und KUTTLER 2013), da durch ihre Beeinflussung, beispielsweise durch veränderte Fassadengestaltungen und Begrünung, die städtische Wärmeinsel verändert werden kann. Zu derartigen Messungen gehören neben der Erfassung aller Strahlungskomponenten und der Wärmeleitung in den Untergrund bzw. in die Gebäude die

Bestimmung des fühlbaren Wärmestroms, der für die Erwärmung der Luft verantwortlich ist, und des latenten Wärmestroms (Verdunstung). Die beiden letztgenannten Energieflüsse beruhen auf der atmosphärischen Turbulenz und lassen sich mit der Eddy-Kovarianz-Methode zuverlässig bestimmen. Hierzu werden Ultraschallanemometer und Gasanalysatoren für die Feuchtemessung bzw. Gasmessungen (z. B. CO₂) eingesetzt (Abb. 10-2b). Problematisch ist der Footprintbereich oder das Messvolumen, welche für alle zu messenden Größen unterschiedlich sind und bei den turbulenten Flüssen sogar recht groß werden (Abb. 10-1). Dies erschwert die vollständige Schließung der Energiebilanz, die auch durch das Vorhandensein lokaler Zirkulationen noch zusätzlich beeinflusst wird (MAUDER et al. 2020).

Die turbulenten Flüsse lassen sich aber auch räumlich gemittelt über größere Bereiche mittels Szintillometer be-

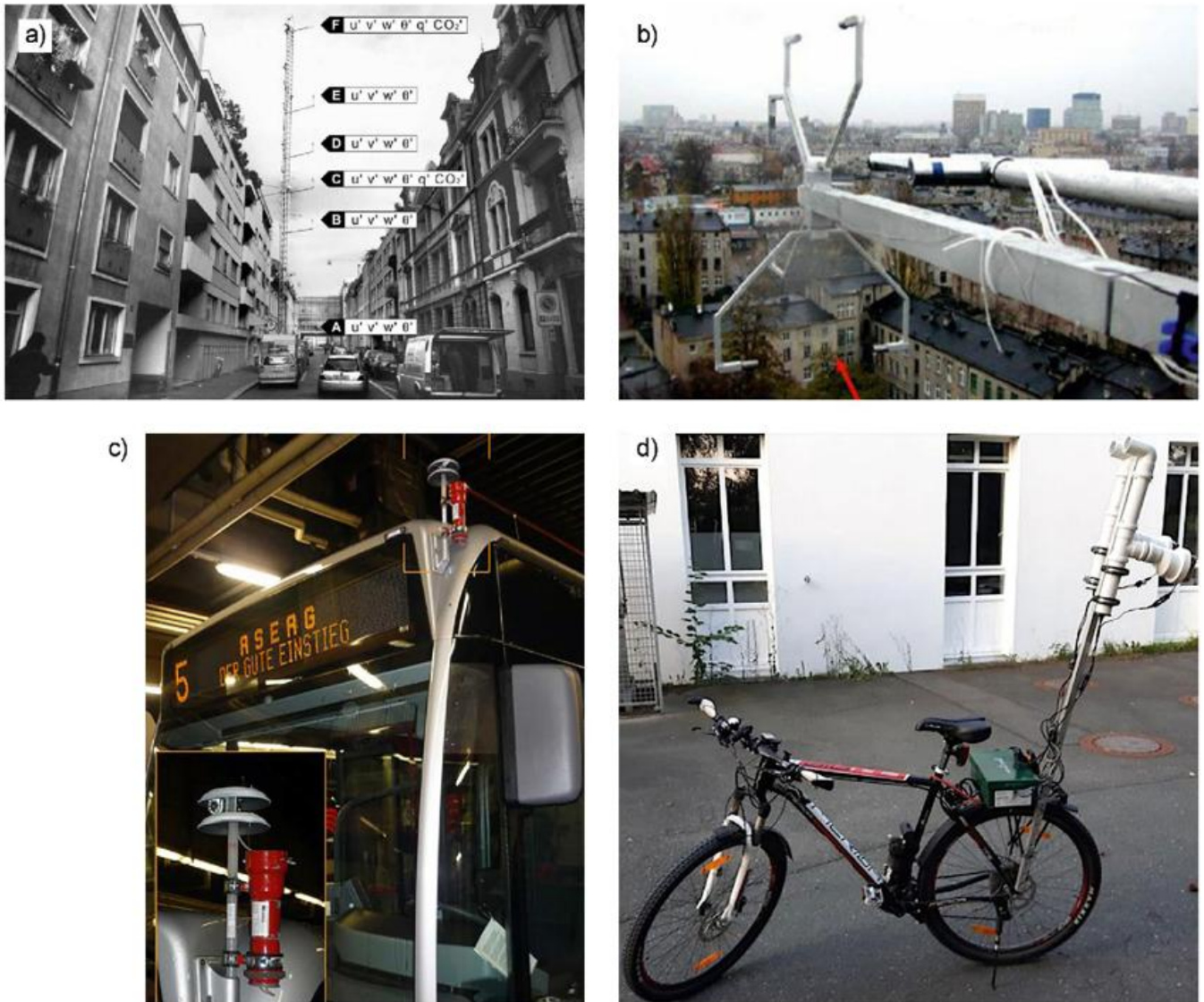


Abbildung 10-2: Messsysteme für Messungen in Stadtgebieten: a) Messmast in einer Straßenschlucht in Basel (aus ROTACH et al. 2005); b) Ultraschallanemometer in Lodz (aus GRIMMOND und WARD 2021, mit freundlicher Genehmigung von Springer); c) Kombiniertes Lufttemperatursensor und GNSS-Datenlogger an einem Linienbus (aus BUTTSTÄDT et al. 2011); d) Messfahrrad mit ventiliertem Lufttemperatursensor der Universität Bayreuth (Foto: A. Tschuschke).

stimmen (WARD 2017). Dazu setzt man *Surface Layer Scintillometer* (SLS) für relativ kurze Messstrecken über dem Boden oder unmittelbar über den Häusern und *Large Aperture Scintillometer* (LAS) über lange Messstrecken bis zu mehreren Kilometern für den fühlbaren Wärmestrom oder Mikrowellenszintillometer für den latenten Wärmestrom ein. Dies ist in Abbildung 10-1 verdeutlicht. Die Empfindlichkeit der Messsysteme ist in der Mitte der Messstrecke am höchsten und nimmt Richtung Sender und Empfänger ab. Ähnliche Ergebnisse lassen sich auch mit unbemannten Fluggeräten (*Uncrewed Aircraft Systems*, UAS) erzielen, wobei die turbulenten Flüsse vorwiegend durch Flächenflugzeuge gemessen werden, während man mit Multikoptern Standardgrößen erfassen kann (BANGE et al. 2021) soweit die rechtlichen Bedingungen den Einsatz zulassen. Für Szintillometer und UAS gilt, dass für jeden Messstreckenabschnitt der Footprint ermittelt werden muss (HUTJES et al. 2010).

Weit verbreitet bei stadtklimatologischen Untersuchungen sind Messfahrten mit Fahrzeugen oder Fahrrädern (Abb. 10-2d), aber auch Messgänge durch Personen mit Messrucksäcken (PARLOW und FOKEN 2021). Um eine große Wiederholrate der Messungen zu erreichen, können auch öffentliche Verkehrsmittel (Abb. 10-2c) mit Messgeräten ausgestattet werden. Hierbei hängt die räumliche Auflösung der Messungen sehr stark von der Geschwindigkeit des Messfahrzeuges und der Zeitkonstanten des Messsystems ab. Dadurch werden niedrige Geschwindigkeiten bevorzugt, was allerdings den Aktionsradius einschränkt, denn Anfangs- und Endzeitpunkt sollten nicht zu weit auseinander liegen. Die räumliche Auflösung in Abhängigkeit vom Abtastschritt ist in Abbildung 10-3 dargestellt. Zu beachten ist, dass ventilierte Widerstandsthermometer eine Zeitkonstante von etwa 10 bis 30 Sekunden haben, das heißt 63 % des Endwertes werden angezeigt; 80 % (90 %, 99 %) des Endwertes nach der 1,6fachen (2,3fachen, 4,6fa-

chen) Zeitkonstanten. Die Zeitkonstante bzw. ein Vielfaches davon müssen so gewählt werden, dass die gewünschte Messgenauigkeit in Abhängigkeit von der zu messenden Differenz und der Genauigkeit des Messgerätes erzielt werden kann. Differenzen werden schon nach kürzerer Zeit mit hoher Genauigkeit gemessen. Die entsprechenden Messwertgeber müssen für derartige Messungen sehr sorgfältig ausgesucht werden (FOKEN 2021). Zur Trendbestimmung der zeitlichen Veränderung der Messgrößen und ggf. der in-situ-Kalibrierung sind zusätzliche stationäre Messstationen notwendig.

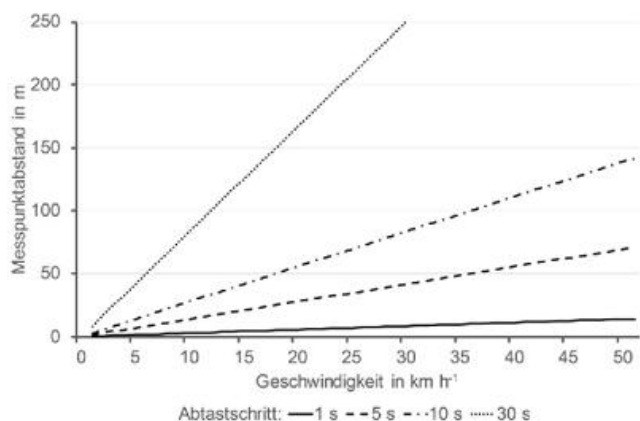


Abbildung 10-3: Abhängigkeit des räumlich auflösbaren Messpunktabstandes von der Geschwindigkeit des Messfahrzeuges für verschiedene Abtastschritte der Messung. Zur praktischen Anwendung nutzt man diese Grafik unter Verwendung der Zeitkonstanten unter Beachtung der gewünschten Messgenauigkeit statt des Abtastschritts.

Zur Erfassung der städtischen Oberflächenwärmeeineln werden häufig Satelliten- und Flugzeugmessungen im thermischen Infrarotbereich genutzt. Derartige Messungen haben den erheblichen Vorteil einer flächenhaften Darstellung, werden aber auch vielfach völlig falsch interpretiert (PARLOW 2021), da die gemessene Oberflächentemperatur nicht identisch mit der Lufttemperatur ist. Demgegenüber werden typische atmosphärische Vorgänge wie Zirkulationen, Advektionen und Konvektion nicht erfasst und somit in ihren Auswirkungen weder verstärkend noch abschwächend interpretiert. Derartige Messungen sind hilfreich, sollten aber immer mit in-situ-Messungen kombiniert werden. Darüber hinaus werden Satelliten- und Flugzeugdaten zusammen mit Modellrechnungen verwendet, um räumlich verteilte Daten zur Strahlungsbilanz und zu den Wärmeflüssen zu erhalten. So kann die Oberflächenalbedo aus Fernerkundungsdaten in den sichtbaren und solar-infraroten Wellenlängen direkt berechnet werden. Auch recht genaue Abschätzungen des Speicherwärmeflusses sind unter Einbeziehung von Satellitendaten möglich (RIGO und PARLOW 2007), zumal der Speicherwärmefluss in urbanen Systemen von zentraler Bedeutung für den städtischen Wärmeinseleffekt ist. Er ist oftmals in der Lage, die nächtliche negative Strahlungsbilanz komplett zu kompensieren und dabei auch in der Nacht noch für einen, wenn auch geringen, fühlbaren Wärmefluss in die Atmosphäre zu sorgen (CHRISTEN und VOGT 2004).

2.3 Verwendung von Massendaten

Die Entwicklung kleiner und billiger Sensoren (*smart sensors*) ermöglicht es zunehmend, auch im privaten Bereich zumindest Lufttemperaturen und Luftfeuchten zu messen, teilweise auch Niederschlag und Wind, wobei gegenwärtig Systeme angeboten werden, die die Daten auch gleich im Internet darstellen. Die Verfügbarkeit der preisgünstigen Technik eröffnet auch dem Laien die Möglichkeit, sich wissenschaftlich zu betätigen, wobei „*Citizen Science*“ die Beteiligung von Personen an wissenschaftlichen Prozessen beschreibt, die nicht in diesem Wissenschaftsbereich institutionell gebunden sind“ (BONN et al. 2016). Die massenhafte Verfügbarkeit von Daten und eine geeignete mathematische Datenselektion eröffnen hier durchaus neue Möglichkeiten, die als *Crowdsourcing* bezeichnet werden (BUDE 2021, FOKEN et al. 2022). Unter *Crowdsourcing* versteht man im Bereich meteorologischer Anwendungen das „Sammeln von nicht klassischen Wetterbeobachtungen aus einer großen Anzahl von Quellen mit hoher Auflösung, insbesondere von einer Reihe von öffentlichen Sensoren, die typischerweise über das Internet verfügbar sind“ (MULLER et al. 2013). Tabelle 10-2 zeigt eine Übersicht zu geeigneten Plattformen für das *Crowdsourcing* meteorologischer Daten, die insbesondere in Städten in großer Anzahl zur Verfügung stehen. Um die Daten wegen der eingeschränkten Kenntnis von Metadaten tatsächlich für eine flächenhafte Darstellung – beispielsweise der räumlichen Temperaturverteilung – verwenden zu können, sind umfassende Fehleranalysen notwendig, um fehlerhafte Daten auszuschließen, aber Informationen über Wärmeinseln oder Kaltluftabflüsse zu erhalten (FENNER et al. 2021). In Deutschland sind private Wetterstationen mit Netatmo-Geräten weit verbreitet, deren Daten man unter <https://weathermap.netatmo.com/> visualisiert sehen kann. Die Stadt Wien nutzt beispielsweise mehr als 1000 derartige Stationen regelmäßig für Stadtklimaanalysen (FEICHTINGER et al. 2020). Ein Beispiel eines Bürgernetzwerkes der Bamberger Innenstadt zeigt Abbildung 10-4.

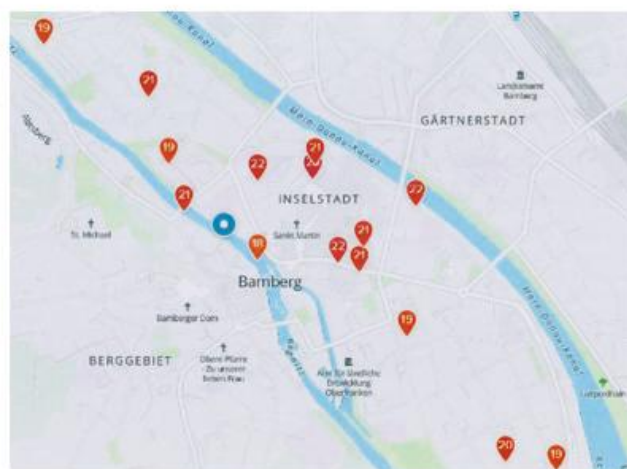


Abbildung 10-4: Netatmo-Messstationen in der Bamberger Innenstadt mit Angabe der Lufttemperatur in °C (Tropennacht, 20.07.2022, 06:15 MESZ), horizontale Distanz ca. 2 km (mit freundlicher Genehmigung von Netatmo, <https://weathermap.netatmo.com/>).

Tabelle 10-2: Geeignete Plattformen für Crowdsourcing (aus FOKEN et al. 2022, Inhalte verkürzt dargestellt).

Geräte mit prinzipiell geeigneten Sensoren	Eignung	Verfügbarkeit
Private automatische Wetterstationen	Gut geeignet	Offene Daten
Smart Home (privat)	Teilweise geeignet, oftmals Detektoren und nicht quantitative Messung	Oft in geschlossenem Netz
Gebäudetechnik (öffentlich, gewerblich)	Geeignet, oft zentrale Erfassung von Wetterdaten	Oft in geschlossenem Netz
Smartphone	Kaum geeignet – verbaute Sensoren sind nicht für die Wetterdatenerfassung gedacht	Oft nicht direkt zugänglich
Smartwatch	Kaum geeignet – verbaute Sensoren, sind nicht für die Wetterdatenerfassung gedacht	Oft nicht direkt zugänglich
Kraftfahrzeug	Kaum geeignet – verbaute Sensoren sind nicht für die Wetterdatenerfassung gedacht	Oft nicht zugängliche Daten, für einzelne Typen möglich (MARQUÈS et al. 2022)
E-Bike, E-Scooter	Kaum geeignet, ggf. als Träger für Sensorensysteme geeignet	-
Wind-, Solar- und Wasserkraftwerke	Teilweise geeignet	Oft nicht direkt zugänglich

3 Physikalische Modellierung

Nachfolgend werden Grundzüge der physikalischen Modellierung bodennaher atmosphärischer Strömungs- und Transportprozesse beschrieben. Neben klassischen Anwendungsfeldern der Windkanalversuchstechnik in der Industrieaerodynamik und Luftfahrttechnik, hat sich seit den 1960er Jahren die Anwendung sogenannter Grenzschichtwindkanäle in der Umwelt- und Ingenieurmeteorologie etabliert (PLATE 1982). Physikalische Modellversuche in Wind- und Wasserkanälen stellten noch bis in die frühen 1990er Jahre die einzige Möglichkeit dar, turbulente Strömungsvorgänge in der bodennahen Grenzschicht wirbelaufösend zu modellieren. Windkanalmodelle sind Forschungs- und Arbeitswerkzeuge bei der Lösung praktischer Problemstellungen wie der Bestimmung von Windlasten auf Bauwerke, der Untersuchung des Windkomforts in Stadtstrukturen oder der Vorhersage des bodennahen Transportes von Luftbeimengungen. Mit der steigenden Leistungsfähigkeit von Computern und der zunehmenden Verfügbarkeit qualifizierter numerischer Modelle hat sich das Anwendungsgebiet von Grenzschichtwindkanälen gewandelt. Eine Vielzahl umweltmeteorologischer Problemstellungen wird heute mithilfe von Computermodellen bearbeitet und Laborversuche im Windkanal dienen eher der Grundlagenforschung, der Modellbildung und in Kombination mit Naturbeobachtungen als Referenzdatenquelle für die Evaluierung numerischer Modelle. Im Gegensatz zu Feldmessungen können im Laborversuch Versuchsrandbedingungen kontrolliert und über hinreichend lange Zeiträume konstant gehalten werden. Dies ermöglicht die Erfassung statistisch repräsentativer Vergleichswerte mit bekanntem Vertrauensbereich und die quantitative Validierung von numerischen Modellen. Qualifizierte Windkanal-

versuchsstände werden von Universitäten und Forschungseinrichtungen und von gutachterlich tätigen Unternehmen betrieben.

3.1 Grundlagen

Viele Faktoren beeinflussen atmosphärische Strömungs- und Transportprozesse. Unter anderem bestimmen thermische Effekte, die Erdrotation und in den bodennahen Luftschichten die Topographie der überströmten Oberfläche den Wind, die Turbulenz und den windgetriebenen Transport von Luftbeimengungen. Die Modellierung entsprechender, stadtklimatisch relevanter Prozesse und Phänomene in speziell adaptierten Wind- und Wasserkanälen nutzt Grundprinzipien der angenäherten physikalischen Ähnlichkeit. Es handelt sich um eine homologe Modellierung, da die Strömungs- und Transportprozesse im Naturmaßstab und im Laborversuch grundsätzlich durch die gleichen Erhaltungsgleichungen beschrieben werden.

Bei der physikalischen Modellbildung wird davon ausgegangen, dass die zu modellierenden stadtklimatischen Prozesse und Phänomene hinreichend vollständig durch die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls, Energie sowie eine Erhaltungsgleichung für transportierte Stoffbeimengungen beschrieben werden. Strömungs- und Transportprozesse in der Atmosphäre und im Laborexperiment stellen eine individuelle Lösung dieses Systems von Erhaltungsgleichungen für die jeweiligen Rand- und Anfangsbedingungen dar.

Im Zuge der Modellbildung werden die Erhaltungsgleichungen in eine dimensionslose Form überführt. Die in den Erhaltungsgleichungen enthaltenen Variablen werden mit-

hilfe der für einen Strömungs- und Transportvorgang charakteristischen Referenz- bzw. Bezugsgrößen für Länge, Strömungsgeschwindigkeit, Dichte, Temperaturdifferenzen und Winkelgeschwindigkeit dimensionslos gemacht. Es entsteht ein System von dimensionslosen Erhaltungsgleichungen, dessen Lösungen für Newton'sche Fluide unabhängig vom konkreten Zeit- und Längenmaßstab und den konkreten Werten der Bezugsgrößen sind. In den dimensionslosen Erhaltungsgleichungen erscheinen dimensionslose Kennzahlen, die Strömungs- und Transportvorgänge charakterisieren und formal im Sinne der Übertragbarkeit von Lösungen im Natur- und Labormaßstab identische Werte annehmen müssen (z. B. SNYDER 1981). Als sogenannte Ähnlichkeitskennzahlen tauchen unter anderem in den Bewegungsgleichungen die Reynoldszahl, die Froudezahl und die Rossbyzahl auf. Die Ähnlichkeitskennzahlen beschreiben Kraft- bzw. Beschleunigungsverhältnisse in der Strömung, die je nach untersuchtem Strömungs- und Transportphänomen von unterschiedlicher Relevanz sind.

Ähnlichkeitskennzahlen können im Laborversuch nicht vollständig eingehalten werden, sobald der geometrische Maßstab des Modellversuchs das Verhältnis von etwa 1:10 unterschreitet und/oder Auftriebs- und Corioliseffekte das zu untersuchende Strömungs- bzw. Ausbreitungsphänomen substantiell beeinflussen. Der Einfluss der Coriolisbeschleunigung wird bei der Windkanalmodellierung im Allgemeinen vernachlässigt. Diese bleiben somit auf die Prandtl-Schicht bzw. die unteren 10 % der atmosphärischen Grenzschichtströmung beschränkt. Der Schichtungszustand der Atmosphäre wird innerhalb der durch Hindernisse (Gebäude bzw. Bewuchs) gebildeten Hindernisschicht häufig ebenfalls als vernachlässigbar klein angenommen, da Windscherung und Turbulenz in und unmittelbar oberhalb der Hindernisschicht für einen intensiven vertikalen Austausch von Luftmassen sorgen und Temperaturgradienten effektiv abgebaut werden. Die Modellierung des Schichtungseinflusses ist dennoch prinzipiell im Laborversuch möglich, und zwar durch Heizung oder Kühlung der überströmten Modellflächen sowie die Erzeugung eines vertikalen Temperaturgradienten in der simulierten Windströmung (RAU et al. 1995, PLATE et al. 1966).

Von besonderer Bedeutung für die Strömungssimulation ist im bodennahen Bereich der atmosphärischen Windgrenzschicht die Reynoldszahl. Das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften charakterisiert den Turbulenzzustand einer Grenzschichtströmung. Kleine Werte der Reynoldszahl können ein Indiz für eine laminare Strömung sein. Insbesondere im durch Hindernisse gestörten bodennahen Windfeld stellt sich fast ausnahmslos eine turbulente Windströmung ein. Durch die Maßstabsreduktion bei Windkanalmodellen finden Laborversuche allerdings grundsätzlich bei einer um mindestens zwei bis drei Größenordnungen kleineren Reynoldszahl als in der Natur statt. Eine strikte Einhaltung der Reynoldszahl ist somit für übliche Modellmaßstäbe in Windkanälen nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. In der Literatur werden verschiedene Gründe beschrieben, die auf die Natur übertragbare

Versuchsergebnisse auch bei geringeren Reynoldszahlen im Laborversuch rechtfertigen. Neben der *laminar flow analogy* (ABE 1941) wird die Modellierbarkeit bodennaher atmosphärischer Grenzschichtströmungen am häufigsten mit dem Konzept der Reynoldszahlunabhängigkeit turbulenter Strömungen begründet. Das von TOWNSEND (1956) vorgestellte Konzept basiert auf der Erkenntnis, dass für geometrisch ähnliche Strömungen die Turbulenzstruktur nach Überschreiten einer bestimmten Reynoldszahl ähnlich bleibt. Das bedeutet, dass in dimensionsloser Form dargestellte Modellergebnisse nur von dimensionslosen Zeit- und Raumskalen, nicht aber von der Reynoldszahl des Modellversuchs abhängen. Ausnahmen bilden lediglich Bereiche bzw. Phänomene in turbulenten Strömungen, die von der Viskosität des strömenden Fluides dominiert werden. Dies betrifft (a) die kleinsten, in einer turbulenten Strömung darstellbaren Wirbel und (b) die von der Viskosität bestimmte Haftbedingung für Fluide an Grenzflächen. Für den Großteil wirbelbehafteter Strömungen überwiegt jedoch der turbulente Impuls-, Energie- und Stoffaustausch den Effekt viskoser Austauschprozesse um ein Vielfaches. Vergleiche von Ergebnissen sorgfältig durchgeführter Modellversuche mit entsprechenden Messungen und Beobachtungen aus der Natur bestätigen das Modellkonzept vielfach.

3.2 Umsetzung/Implementierung von Modellversuchen

Modellversuche im Windkanal können auf die Natur übertragbare Ergebnisse liefern, wenn die beschriebene Reynoldszahlunabhängigkeit der Modellströmung experimentell nachgewiesen wird und wenn die dimensionslosen Randbedingungen bezüglich Modellgeometrie und Modellanströmung in Modell und Natur hinreichend ähnlich sind. Geometrische Ähnlichkeit, zum Beispiel für eine Stadtgeometrie oder einen umströmten Gebäudekomplex, kann vergleichsweise leicht und mit hohem Detailgrad erreicht werden. Im Gegensatz dazu stellt die Erzeugung einer physikalisch ähnlichen Modellanströmung gegebenenfalls eine Herausforderung dar. In der Messstrecke des Windkanals muss eine naturähnliche Modellanströmung im gewünschten geometrischen Modellmaßstab erzeugt, durch Messungen dokumentiert und durch Vergleich mit Vorgabewerten aus der Natur verifiziert werden. Hinweise zur Implementierung und Dokumentation von Modellversuchen und zur Verifikation der Versuchsrandbedingungen geben Richtlinien und Qualitätsstandards für Windkanalversuche in der Umweltmeteorologie (z. B. VDI 2022).

Zur Erzeugung naturähnlicher Grenzschichten eignen sich speziell adaptierte Windkanalversuchsstände mit einer hinreichend langen Anlauf- und Messstrecke. Meist werden mithilfe sogenannter Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten im Anlaufbereich naturähnliche Strömungsverhältnisse bis in eine Höhe simuliert, die dem Mehrfachen der mittleren Höhe der überströmten Modellgebäude bzw. Hindernisse entspricht. Grenzschichtwindkanäle mit geschlossener Mess- und Anlaufstrecke verfügen in der Regel



Abbildung 10-5: Zur Erzeugung einer naturähnlichen Windströmung in einem Grenzschichtwindkanal verwendete Bodenrauigkeiten und Turbulenzgeneratoren (Bildhintergrund, rot); (Foto: EWTL, Universität Hamburg).

über eine verstellbare Kanaldecke. Durch die Höhenverstellung wird die durch Bodenrauigkeiten, Modelleinbauten und anwachsende Wandgrenzschichten verursachte aerodynamische Versperrung des Strömungsquerschnittes kompensiert. Auf diese Weise können naturähnliche Turbulenzeigenschaften auch für sogenannte Gleichgewichts- bzw. Gleichdruckgrenzschichten erreicht werden.

Abbildung 10-5 zeigt exemplarisch einen Versuchsaufbau in einem Windkanal mit 4 m breiter und 3 m hoher Messstrecke. Mithilfe der Turbulenzgeneratoren und den zusätzlichen Bodenrauigkeiten wird die bodennahe Windgrenzschicht bis in etwa 100 m Höhe über dem Boden im Maßstab 1:300 naturähnlich abgebildet.

In Abbildung 10-6 sind beispielhaft zwei grundlegende, in einem Windkanalversuch gemessene Strömungs- und Turbulenzcharakteristika im Vergleich mit Vorgabewerten aus der Natur dargestellt. Die vollständige Dokumentation modellierter Windgrenzschichten umfasst neben Modellparametern wie dem Modellmaßstab unter anderem in der Modellanströmung gemessene repräsentative Vertikalprofile der mittleren Windgeschwindigkeit, der Turbulenzintensität, des vertikalen turbulenten Impulsflusses, des Integralmaßes der Turbulenz und der spektralen Verteilung der kinetischen Energie der Turbulenz und über den für die Modellversuche relevanten Bereich turbulenter Schwangungsfrequenzen.

Die vollständige Dokumentation modellierter Windgrenzschichten umfasst neben Modellparametern wie dem Modellmaßstab unter anderem in der Modellanströmung gemessene repräsentative Vertikalprofile der mittleren Windgeschwindigkeit, der Turbulenzintensität, des vertikalen turbulenten Impulsflusses, des Integralmaßes der Turbulenz und der spektralen Verteilung der kinetischen Energie der Turbulenz und über den für die Modellversuche relevanten Bereich turbulenter Schwangungsfrequenzen.

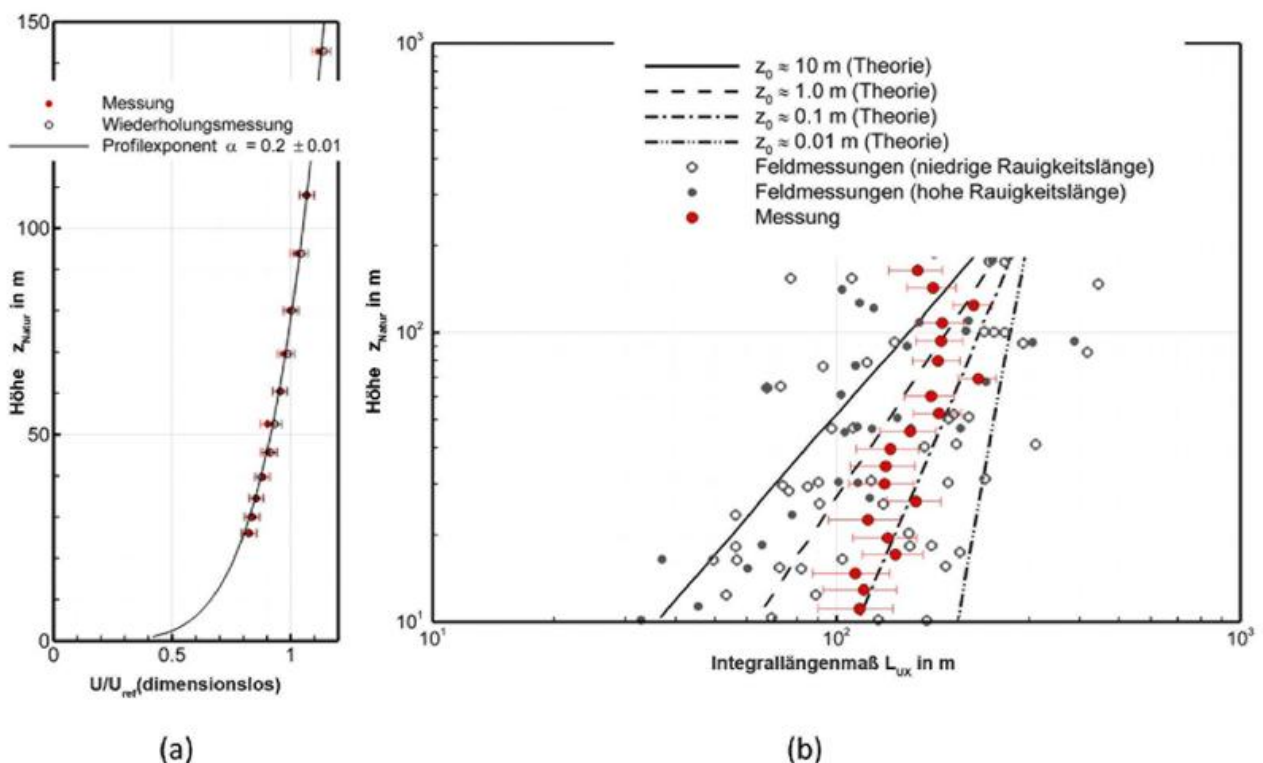


Abbildung 10-6: Exemplarische Darstellung grundlegender Strömungscharakteristika einer im Windkanal simulierten Strömungsgrenzschicht im Vergleich mit Referenzwerten: (a) mittleres Windprofil, (b) Vertikalprofil des Integralmaßes L_{ux} (Abbildung: EWTL, Universität Hamburg).

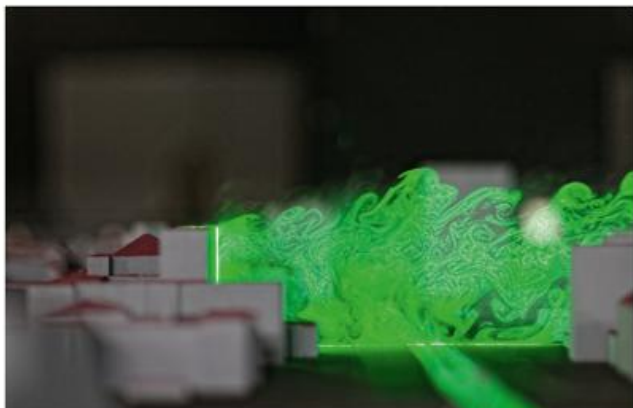


Abbildung 10-7: Visualisierung turbulenter Wirbel in einer im Windkanal modellierten Straßenschlucht mittels Laser-Lichtschnitt-Verfahren (Momentaufnahme, Strömungsrichtung von links nach rechts, Modellmaßstab 1:500, mittlere Gebäudehöhe ca. 25 m); (Foto: EWTL, Universität Hamburg).

Transportprozesse wie zum Beispiel die Ausbreitung passiver Luftbeimengungen werden im Modellversuch mithilfe von Mess- bzw. Tracergasen simuliert. Auch bei der Emissions- und Ausbreitungsmodellierung ist die Übertragbarkeit der Modellergebnisse auf die Natur mithilfe von Ähnlichkeitskennzahlen zu dokumentieren und experimentell nachzuweisen. Für die Simulation impulsbehafteter Stofffreisetzungen, zum Beispiel aus einem Abluftkamin oder einer Lüftungsöffnung, sind die unter anderem in VDI (2022) definierten Kenngrößen Impulsstromdichteverhältnis, die Austritts-Reynoldszahl und für auftriebsbeeinflusste Stofffreisetzungen die densimetrische Froudzahl hinreichend genau abzubilden und die Übertragbarkeit der dimensionslosen Versuchsergebnisse ist experimentell nachzuweisen.

Für Strömungs- und Ausbreitungsmessungen in Grenzschichtwindkanälen steht eine Vielzahl etablierter Visualisierungs- und Messverfahren zur Verfügung, auf die hier nicht detailliert eingegangen werden kann. Typische Labormesstechnik wird ebenfalls in VDI (2022) aufgelistet. Am Beginn einer Messreihe stehen häufig Visualisierungsexperimente, die sehr schnell einen Überblick über komplexe Strömungs- und Ausbreitungsmuster vermitteln und eine effiziente Planung von Messungen ermöglichen. Turbulente Strömungs- und Ausbreitungsmuster werden beispielsweise durch Aerosole markiert und innerhalb einer dünnen Lichtebeine, einem sogenannten Lichtschnitt, visualisiert (Abb. 10-7).

Für turbulenzauflösende Strömungsmessungen werden unter anderem laseroptische Messverfahren wie Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) oder *Particle Image Velocimetry* (PIV) verwendet. Diese Messverfahren bieten gegenüber traditioneller Messtechnik den Vorteil, dass die Strömung am Ort der Messung nicht durch einen Sondenkörper beeinflusst wird und die Komponenten des Windvektors direkt aufgelöst werden. Diese Messungen erfolgen entweder punktweise zeitseriell (LDA) oder an vielen Messpositionen zeitgleich innerhalb einer Messebene

(PIV). Die erreichbare zeitliche und räumliche Auflösung von Labormessungen entspricht, übertragen auf den Naturmaßstab, mindestens der einer korrespondierenden Feldbeobachtung und gestattet die Auflösung relevanter turbulenter Strukturen.

Für Immissionsmessungen werden in Abhängigkeit von der gewünschten zeitlichen und räumlichen Auflösung der Messung und dem verwendeten Tracergas unter anderem Elektronen-Einfangdetektoren (ECD), Messgeräte auf Basis nicht dispersiver Infrarotabsorption (NDIR) oder auch Flammenionisationsdetektoren (FID) verwendet.

3.3 Anwendungsbeispiel – Windgetriebener Stofftransport in bebauten Strukturen

Mithilfe von Grenzschichtwindkanälen können Strömungs- und Transportprozesse in der bodennahen Hindernisschicht wirbel- und hindernisauflösend simuliert werden. Windkanalversuche werden daher bevorzugt verwendet, wenn Windturbulenz und die daraus resultierende räumliche und zeitliche Variabilität von Strömungs- und Transportgrößen einen Prozess oder ein Phänomen dominieren. Einen entscheidenden Einfluss hat Windturbulenz unter anderem auf die Wirkung von Windkräften auf Bauwerke, den Windkomfort für Fußgänger bzw. die Böigkeit des Windes in bebauter Umgebung oder den Transport von Luftschadstoffen und/oder wärmebelasteten Luftmassen in Stadtgebieten. Nachfolgend wird exemplarisch die Untersuchung bodennaher Transporte passiver Luftbeimengungen in Stadtstrukturen skizziert. Auch bei dieser umweltmeteorologisch relevanten Modellierungsaufgabe sind Turbulenz und Variabilität des Windes auf kurzen Zeitskalen bestimmend.

Derartige Untersuchungen werden unter anderem im Zusammenhang mit der Ausbreitung von verkehrserzeugten oder industriebedingten Luftschadstoffen, zur Bestimmung der Ventilation und Frischluftzufuhr in bebauten Gebieten oder beispielsweise auch im Zusammenhang mit der störfallartigen Freisetzung von Gefahrstoffen bei Industrie- und Transportunfällen durchgeführt. Typische Modellmaßstäbe in Grenzschichtwindkanälen unterschiedlicher Größe betragen etwa 1:100 bis etwa 1:600. Große Modellmaßstäbe erfordern Grenzschichtwindkanäle mit großem Strömungsquerschnitt, um große turbulente Wirbelstrukturen in einer naturähnlichen Modellanströmung erzeugen zu können und die Versperrung des Strömungsquerschnitts durch Modellkörper in vertretbaren Grenzen zu halten. Für Modellmaßstäbe deutlich kleiner 1:600 werden Modellgebäude eher klein und relevante Strömungsprozesse in Wandnähe können nicht mehr adäquat abgebildet werden. Da die räumliche und zeitliche Auflösung der Windkanalmessungen durch verwendete Messverfahren vorgegeben ist, sinkt die erreichbare räumliche und zeitliche Auflösung im Modellversuch, je kleiner der gewählte Modellmaßstab ist. Neben der Messauflösung bestimmen wiederum die Größe des zur Verfügung stehenden Windkanalversuchsstandes und die für eine Untersuchung mindestens erforder-

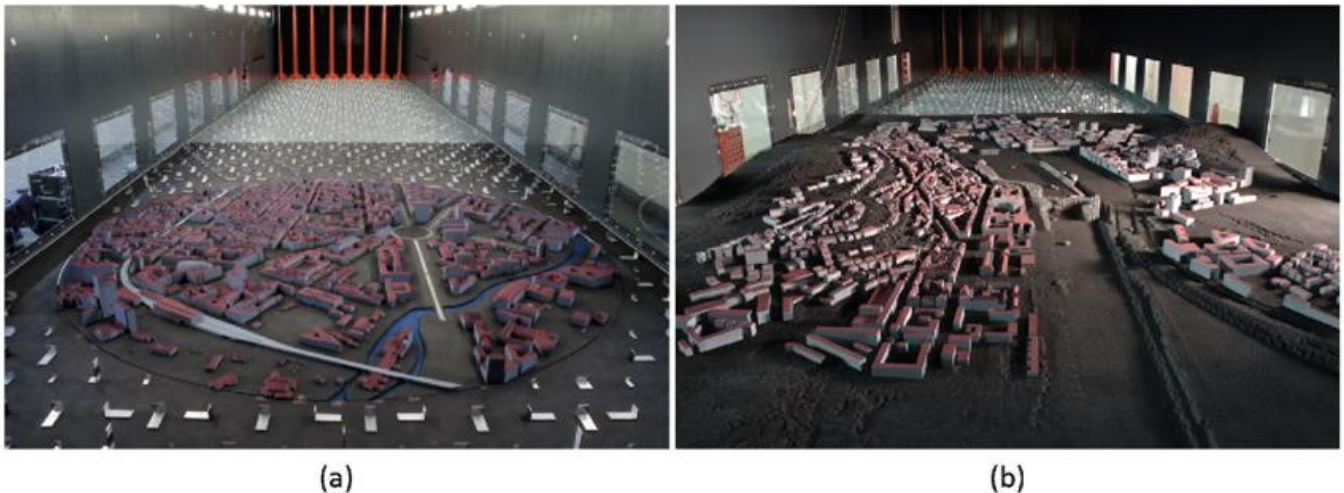


Abbildung 10-8: (a) Modell Ernst-Reuter-Platz Berlin auf einer Drehscheibe zur Variation der mittleren Windrichtung (Durchmesser des Modellgebietes 1,75 km im Naturmaßstab, Modell ohne Simulation des Einflusses von Stadtbäumen/Stadtgrün); (b) Korridormodell Stuttgart Neckartor (Modellgebiet 3 km x 2 km, Geländemodellierung mit ca. 70 m Höhenunterschied, Bildmitte: ringförmige Strömungswiderstände zur lokalen Simulation des Einflusses von Stadtbäumen); (Fotos: EWTL, Universität Hamburg).

derliche Modellgebietsgröße wesentlich die Wahl des Modellmaßstabes. Zu berücksichtigende Orographie kann die Festlegung der Modellgebietsgröße und den Modellmaßstab ebenfalls beeinflussen.

Abbildung 10-8a zeigt das Modell einer typischen Stadtstruktur ohne orographischen Einfluss in einem Grenzschichtwindkanal mit 4 m breitem und ca. 3 m hohem Messquerschnitt. Für die Untersuchung verschiedener mittlerer Windrichtungen ist das Gesamtmodell auf einer drehbaren Kreisscheibe aufgebaut. Modelle können bei Bedarf luv- und leeseitig des Untersuchungsgebietes verlängert werden. In sogenannten Korridormodellen werden Strömungs- und Ausbreitungsprozesse für ausgewählte mittlere Windrichtungen auch über größere Transportentfernungen untersucht. Im in Abbildung 10-8b dargestellten Korridormodell wurde lokale Orographie und die lokale aerodynamische Wirkung von Stadtbäumen mittels äquivalenter aerodynamischer Hindernisse (ringförmige Porös-Körper mit höhenabhängigem Durchströmwiderstand) im Modell berücksichtigt.

Die punktförmige bzw. linien- oder flächenhafte Freisetzung zum Beispiel von Fahrzeugabgasen wird durch Emissionsquellen im Modell realisiert. Geeignete Modell-emissionsquellen weisen einen hinreichend hohen Durchströmwiderstand auf, sodass selbst bei modellbedingt kleinsten Freisetzungsraten und stark variierenden Winddrücken im Freisetzungsbereich die Emissionsrate präzise eingestellt und eingehalten werden kann. Auch die Simulation von Emissionen aus bewegten Einzelfahrzeugen ist technisch möglich. Mit Blick auf die Raum- und Zeitskalen der Abgasausbreitung ist die Einzelfahrzeugsimulation für eine Immissionsbewertung unmittelbar an einer Fahrspur bzw. für die Bestimmung maximaler Luftbelastungswerte im Minuten- bzw. Sekundenbereich relevant.

Mit geeigneter Konzentrationsmesstechnik können turbulenzauflösend Zeitserien der Luftbelastung aufgezeichnet

und unter anderem bezüglich der Überschreitungshäufigkeit bestimmter Immissionsgrenz- oder Dosiswerte analysiert werden. In Abhängigkeit von der Fluktuationscharakteristik des Konzentrationssignals sind bei gleicher mittlerer Luftbelastung erhebliche Unterschiede in der Luftschadstoffexposition nachweisbar. Dosisbelastungs- bzw. Expositionswerte sind beispielsweise für die Bewertung von Gesundheitsgefahren im Zusammenhang mit Luftschadstoffen von Bedeutung. Das Über- und Unterschreiten bestimmter Konzentrationswerte ist unter anderem für die Wahrnehmung von Gerüchen oder die Vorhersage zündfähiger Gasgemische bei Freisetzungen brennbarer Gase relevant. Abbildung 10-9 zeigt beispielhaft ein typisches, in Lee einer punktförmigen Freisetzung gemessenes dimensionsloses Konzentrationsmesssignal, das Auswirkungen eines Transportunfalls auf einem Gewässer simuliert. Obwohl der Messort in Windrichtung exakt im Lee der kontinuierlich emittierenden Emissionsquelle angeordnet ist, werden stark variierende Konzentrations-signale und längere Phasen ohne Konzentrationssignal am Messort registriert, welche durch im Windkanalversuch naturähnlich nachgebildete bodennahe turbulente Wirbel verursacht werden.

Mithilfe von Windkanalversuchen können auch Informationen zur Ventilation bzw. zur Reisezeit und zur Aufenthaltsdauer von Luftmassen in Stadtstrukturen gewonnen werden. Zur Bestimmung der Reisezeit einzelner Luftpakete vom Freisetzungsort zum Immissionsort wird eine instantan zu- bzw. abschaltbare Emissionsquelle verwendet und die Zeit vom Beginn der Freisetzung bis zum Nachweis vom Messgas am Immissionsort gemessen. Entsprechende Einzelmessungen müssen in komplexen Stadtstrukturen mit turbulenten Windverhältnissen mehrere hundert Mal wiederholt werden, um ein statistisch repräsentatives Datenensemble zu erhalten. Dies ermöglicht Aussagen nicht nur zur mittleren Reisezeit von Luftmassen. Auch hier erweist sich der im Windkanalversuch inhärent vor-

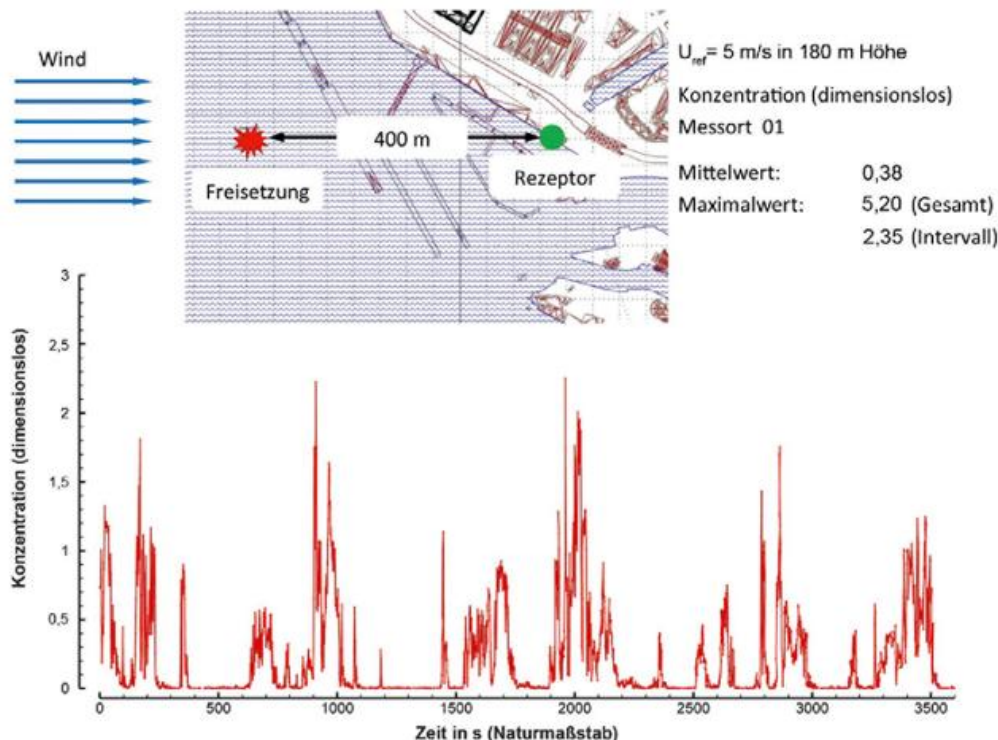


Abbildung 10-9: Intermittierendes Konzentrationsmesssignal im Lee einer punktförmigen Freisetzung (rot: Freisetzungsort, grün: Messort; mit einer Referenzwindgeschwindigkeit von 5 m s^{-1} in 180 m Höhe auf die Natur übertragenes Messsignal im Abstand von 400 m vom Freisetzungsort). Angegebene Maximalwerte beziehen sich auf das gesamte Messzeitintervall (15 Stunden) und das dargestellte Zeitintervall (1 Stunde); (Abbildung: EWTL, Universität Hamburg).

handene Zeitmaßstab als Vorteil, da separate Einzelfreisetzungen innerhalb weniger Sekunden im Labor unter gleichen mittleren Randbedingungen wiederholt werden können.

Zur Bestimmung der Aufenthaltsdauer von Luftmassen in bebauter Umgebung werden Windkanalmodelle bis zum Erreichen eines quasi-stationären Konzentrationswertes mit Tracergas beaufschlagt. Anschließend wird die Messgaszufuhr schlagartig unterbrochen. In Abhängigkeit vom Ventilationspotenzial eines Standortes nimmt die gemessene

Tracergaskonzentration mehr oder weniger schnell ab und eine vergleichende Bewertung der Ventilation wird möglich. Zum Beispiel können Ventilationsexperimente mit verschiedenen Bebauungs- oder Stadtgrün-Varianten durchgeführt und auf diese Weise die Wirkung entsprechender Einzelmaßnahmen auf den Luftaustausch in einem Stadtquartier untersucht werden. Abbildung 10-10 zeigt beispielhaft Ausschnitte eines für die Untersuchung des Einflusses von Stadtgrün (Baumbepflanzung) auf die Ventilationsverhältnisse in einem Stadtquartier verwendeten Windkanalmodells mit unterschiedlich modellierter Baumdichte.

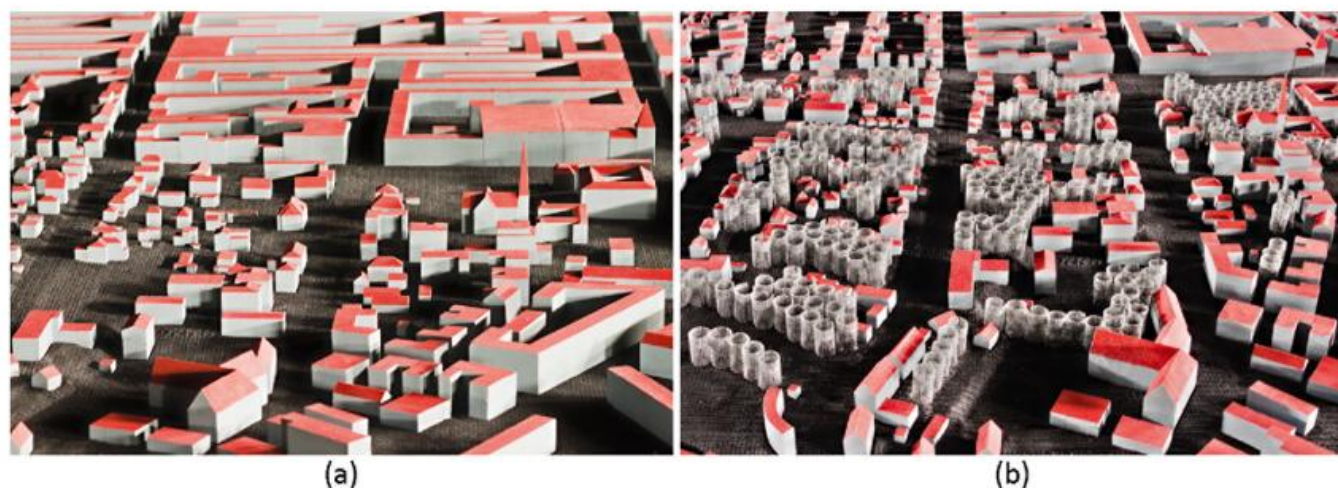


Abbildung 10-10: Modellierung von Stadtgrün bei Ventilationsuntersuchungen in einem Stadtmodell: (a) Untersuchungsgebiet ohne Simulation des Effektes von Stadtgrün / Winter-Fall; (b) Modellgebiet mit Simulation des aerodynamischen Effektes von Stadtbäumen durch ringförmige Poröskörper / Sommer-Fall (Abbildungen: EWTL, Universität Hamburg).

4 Numerische Simulationsmodelle

4.1 Grundlagen

Numerische Simulationsmodelle zur Beschreibung des Stadtklimas basieren auf den Bilanzgleichungen für Impuls (Bewegungsgleichung), für Masse (Kontinuitätsgleichung), für Feuchte und für die innere Energie (1. Hauptsatz der Thermodynamik) und werden problemabhängig noch um spezifische Gleichungen erweitert, beispielsweise für Luftbeimengungen. Auf dieser Grundlage wurden in den letzten Jahren, gerade in Deutschland, eine ganze Reihe von hochwertigen Modellen für unterschiedliche Skalen entwickelt. Im Themenfeld Stadtklima muss hierbei zwischen mikroskaligen und mesoskaligen Modellen unterschieden werden. Bei den mikroskaligen Modellen können in der Regel sehr feinskalige Stadtstrukturen wie Gebäude oder Bäume berücksichtigt und deren Auswirkungen auf die verschiedenen meteorologischen Parameter wie Wind, Temperatur und Feuchte studiert werden. Typische Realisierungen für diese Art von Modellen sind (alphabetisch, nicht vollständig): ASMUS, ENVI-met, MISKAM, MITRAS, MUKLIMO oder PALM-4U (EICHHORN und KNIFFKA 2010, GRAWE et al. 2013, MARONGA et al. 2020, SIEVERS 2012, SIMON et al. 2018). Dieser Modelltyp kommt typischerweise bei Untersuchungen für einzelne Häuserblocks oder Stadtquartiere zum Einsatz.

Mesoskalige Modelle, bei denen nur deutlich größere räumlichen Strukturen Eingang finden können, kommen zum Einsatz, wenn die vielfältigen Wechselwirkungen der Stadt mit ihrer Umgebung, wie Landnutzung und insbesondere der Orografie, von Bedeutung sind. Die Stadtstrukturen werden dabei nur noch in sehr vereinfachter Form (Rauigkeitslänge, Widerstandskonzept, Porositätsansatz) berücksichtigt. Auch hier stehen in Deutschland eine Reihe von Modellrealisierungen gleichwertig zur Verfügung (alphabetisch, nicht vollständig): COSMO-ART, FITNAH, METRAS oder ProWiMo (ATHANASOPOULOU et al. 2017, FLASSAK 2018, HOFFMANN et al. 2018).

Das oben genannte gekoppelte Gleichungssystem ist analytisch nicht lösbar und wird daher näherungsweise gelöst. Dabei erfolgt eine Darstellung auf einem numerischen Gitter, bei dem die verschiedenen meteorologischen Variablen nur noch an diskreten Punkten dieses Gitters definiert sind. Die Differentialquotienten werden dabei durch Differenzenquotienten approximiert und das Voranschreiten in der Zeit erfolgt in diskreten Zeitschritten. Der horizontale Abstand der Gitterpunkte, Δx , bestimmt dabei auch Strukturen, die von dem jeweiligen Modell noch erfasst und berechnet werden können. Bei den mikro-skaligen Modellen wird typischerweise $\Delta x = 1-5$ m verwendet, bei mesoskaligen Modellen $\Delta x = 10-100$ m.

Durch diese Diskretisierung und die damit einhergehende Mittelung tauchen in den Gleichungen Terme für die turbulenten Flüsse auf. Bei der Mehrzahl der Modelle werden diese turbulenten Flüsse mithilfe des Gradientenansatzes pa-

rametrisiert (RANS-Modelle). LES (*Large Eddy Simulation*)-Modelle wie beispielsweise PALM-4U (MARONGA et al. 2020) gehen einen bedeutenden Schritt weiter und eröffnen durch die explizite Simulation der turbulenten Strukturen eine völlig neue Betrachtungsweise.

Obwohl alle oben genannten numerischen Modelle auf dem gleichen Satz der grundlegenden Bilanzgleichungen basieren, unterscheiden sich die einzelnen Realisierungen teilweise sehr deutlich voneinander. Unterschiede resultieren beispielsweise durch die Vorgehensweise bei der angesprochenen numerischen Lösung bei Art und Umfang der Berücksichtigung von räumlich und zeitlich nicht aufgelösten Strukturen und Prozessen (Parametrisierungen) oder auch bei den gewählten Randbedingungen. Dem unteren Rand entlang der Erdoberfläche oder auch der Berandung von Gebäuden kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da hier der größte Energieumsatz im Laufe eines Tages stattfindet. Insbesondere kann mit der Energiebilanz (KUTTLER und GROSS 2023) die Temperatur der Unterlage berechnet werden. Dabei muss allerdings noch in Ergänzung auch die Temperatur und die Feuchte im Untergrund berechnet sowie der Energieaustausch mit den Bebauungsstrukturen Berücksichtigung finden. Auch für größere Wasserkörper innerhalb einer Stadt kann mithilfe der Energiebilanz die Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von Strahlungsbilanz, Wind, Lufttemperatur und Luftfeuchte simuliert werden.

4.2 Eingangsdaten

Die Berechnung der räumlichen und zeitlichen Verteilung verschiedener meteorologischer Parameter mithilfe von numerischen Simulationsmodellen erfolgt auf einem Rechengitter mit vorgegebener horizontaler Maschenweite Δx . Auf diesem Gitter müssen die lokalen Besonderheiten einer Landschaft und die Charakteristika der Unterlage beschrieben werden. Während die Bereitstellung der mittleren Geländehöhe oder Gebäudehöhe, die Lage und Höhe von Bäumen und der in diesem Raster repräsentativen Landnutzung noch hinreichend genau ermittelt werden kann, stellt sich die genaue Beschreibung der Boden- und Oberflächeneigenschaften schon deutlich schwieriger dar. Man muss sich dabei immer vor Augen halten, dass die Güte des Simulationsergebnisses sehr stark von der Qualität der Eingangsdaten abhängt.

Von vielen notwendigen Eingangsdaten, die beispielsweise den Erdboden oder auch eine Häuserwand charakterisieren, sind aufgrund von Messungen und Feldexperimenten die Größenordnungen bekannt, aber nicht die exakten Werte für eine spezifische Simulation. Der Anwender eines numerischen Simulationsmodells muss sich daher in den meisten Fällen für einen Wert aus der Literatur entscheiden und die entsprechenden Unsicherheiten bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigen.

Welche Unsicherheiten durch die Unkenntnis der Eingangsdaten auftreten können, ist in Abbildung 10-11 ge-

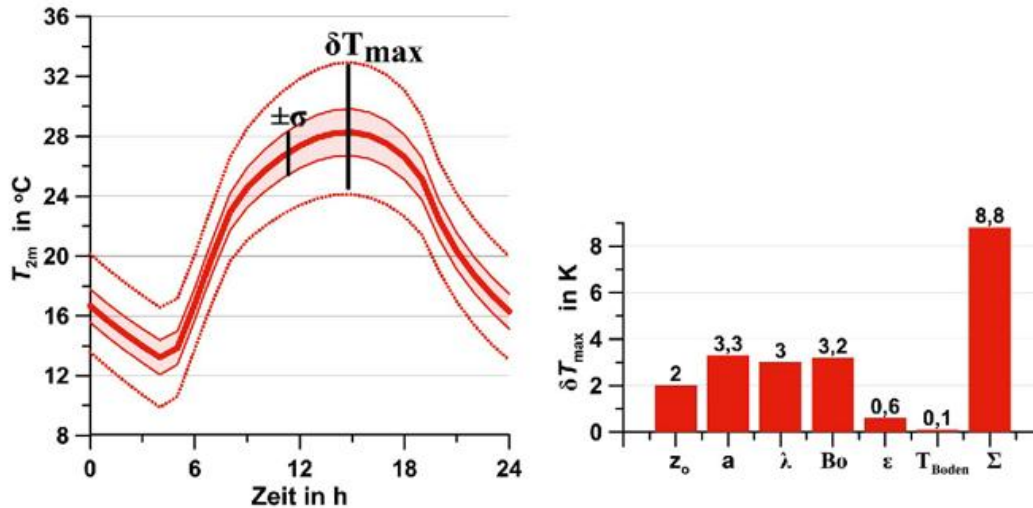


Abbildung 10-11: Tagesgang der Bandbreite der Lufttemperatur in 2 m Höhe bei Variation von Eingangsdaten (links) und maximaler Effekt für einzelne Parameter (rechts); (nach GROSS 2019).

zeigt. Die Untersuchungen hierfür wurden für das relativ einfache Szenario einer homogenen Unterlage durchgeführt (GROSS 2019). Für eine komplexe Umgebung wie eine Stadt, bei der deutlich mehr Eingangsdaten spezifiziert werden müssen, können die Effekte noch größer sein. Bei diesen Untersuchungen wurden beispielsweise die Rauigkeitslänge ($0,03 \text{ m} < z_0 < 0,06 \text{ m}$), die Albedo ($0,12 < a < 0,24$), die Wärmeleitfähigkeit ($0,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} < \lambda < 1,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) oder das Bowen-Verhältnis ($0,4 < Bo < 0,7$) variiert und die Auswirkungen aller möglichen Parameterkombinationen auf die 2-m-Lufttemperatur studiert. Typischerweise betragen die Unsicherheiten während der Tagstunden $\pm 2 \text{ K}$, bei ungünstigen Kombinationen kann dieser Wert auch $\pm 4 \text{ K}$ erreichen.

Diese Untersuchung verdeutlicht, dass der Genauigkeit der Eingangsdaten eine sehr große Bedeutung zukommt.

4.3 Anwendungsbeispiele

Im Folgenden sollen einige wenige Anwendungsbeispiele demonstrieren, dass mikro- und mesoskalige Stadtklimamodelle mächtige Werkzeuge für die Bereitstellung meteorologischer Parameter in einer urbanen Umgebung darstellen. Alle Modelle dieser Art (eine Auswahl ist weiter oben genannt) sind in der Lage, ähnliche Ergebnisse zu berechnen.

4.3.1 Mesoskalige Berechnung: Stadt mit Umgebung

Eine Stadt ist eingebettet in eine geografische Umgebung und einer spezifischen Verteilung der Landnutzung. Das Stadtklima wird insbesondere von den daraus resultierenden vielfältigen Wechselwirkungen beeinflusst. In Abbildung 10-12 sind die mit dem Modell FITNAH berechneten

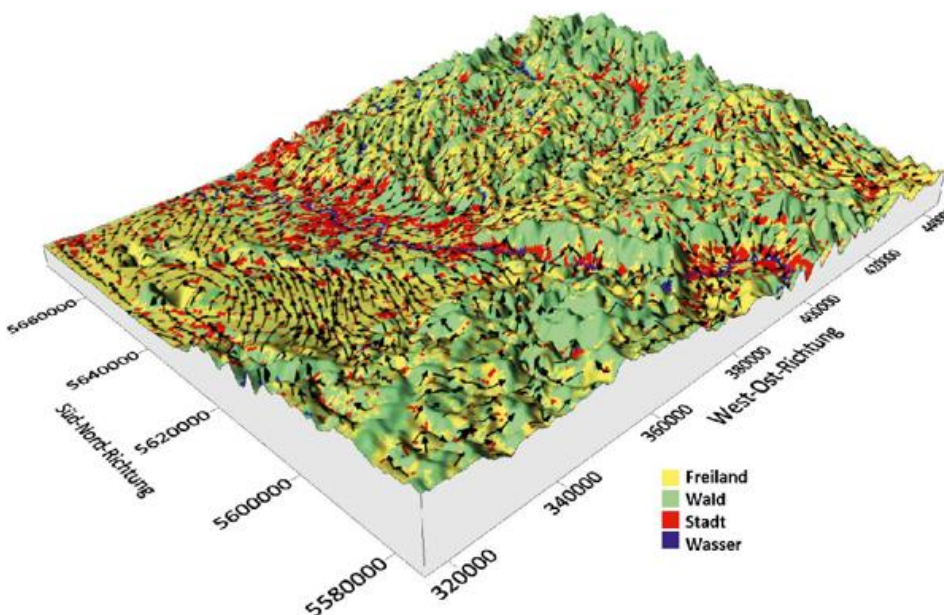


Abbildung 10-12: Berechnete mesoskalige Verteilung der bodennahen Windverhältnisse (Pfeile) in einer orografisch strukturierten Landschaft. Die Farben geben die Hauptlandnutzung an.

bodennahen Windverhältnisse in der Umgebung einer Stadt gezeigt, die einen Eindruck derartiger Wechselwirkungen vermitteln sollen. In den Nachtstunden kann beispielsweise der sich aufgrund des Temperaturunterschiedes Stadt-Umland ausbildende Flurwind kühlere Luft aus der Umgebung in die Stadtrandbereiche führen und dort zu einer Reduzierung der städtischen Wärmeinsel beitragen. Solche Flurwindssysteme aus dem ruralen Umland sind allerdings von Betrag und vertikaler Mächtigkeit nur relativ schwach ausgebildet und dringen in der Regel nicht bis zum Stadtzentrum (rot) vor. Bei einer vorhandenen größeren Reliefenergie entwickeln sich an den Hängen in den Nachtstunden deutlich kräftigere

Hangabwinde. Über den geneigten Freiflächen (gelb) kühlt sich die Luft stärker ab als die Luft in der gleichen Höhe der angrenzenden Atmosphäre und fließt dann über niedriger gelegene Geländeteile ab. Auch bewaldete Hänge (grün) sind in den Nachtstunden gute Kaltluftproduzenten. Bodennah wird die Strömung durch die vorhandenen Bestandsstrukturen zwar stark verzögert, aber in Höhe der Energieumsatzfläche im Bereich des oberen Kronendrittels kann die dort gebildete Kaltluft oberhalb des Bestandes abfließen (SEDLMEIER und TINZ 2023). Diese Luft kühlt sich zwar nicht so stark ab wie am Erdboden, allerdings wird durch die verstärkte Turbulenz oberhalb des Bestandes ein vertikal mächtigeres Volumen abgekühlt. So bilden sich an allen Hängen Hangwind-systeme aus, die in breiteren Tälern konvergieren und aus dem Tal in die vorgelagerte Ebene ausfließen. Die Reichweite und vertikale Mächtigkeit dieser Luftbewegung kann beträchtlich sein und unter günstigen Umständen zu einer sehr guten Durchlüftung eines Stadtkörpers führen. Wo und wie weit diese Kaltluft in den Stadtkörper eindringt und an welchen Stellen die Durchlüftungssituation durch die vorhandene Bebauung behindert wird, kann mithilfe mesoskaliger Simulationen erfasst werden.

4.3.2 Mikroskalige Berechnung mit Gebäuden

Bei mesoskaligen Simulationen werden in der Hauptsache das allgemeine Strömungsgeschehen in einem größeren Landschaftsraum und die sich daraus ergebenden Effekte auf die Lufttemperatur studiert. Einzelne Gebäude können nicht realitätsnah dargestellt werden. Dies gelingt erst mit mikroskaligen Simulationen, bei denen die räumliche Auflösung im Bereich von Metern liegt. Aber auch bei einer derartig feinen räumlichen Auflösung können feinskalige Strukturen wie Balkone, die durchaus nennenswerte lokale Effekte auf die Lufttemperatur und den Wind haben können, nicht berücksichtigt werden.

Als Beispiel für ein Ergebnis einer mikroskaligen Simulation ist in Abbildung 10-13 die mit ASMUS berechnete Wind- und Lufttemperaturverteilung in einer Höhe von 2 m Höhe gezeigt. Es handelt sich dabei um ein Szenario mit einem überlagerten Westwind. Als Zeitpunkt für die

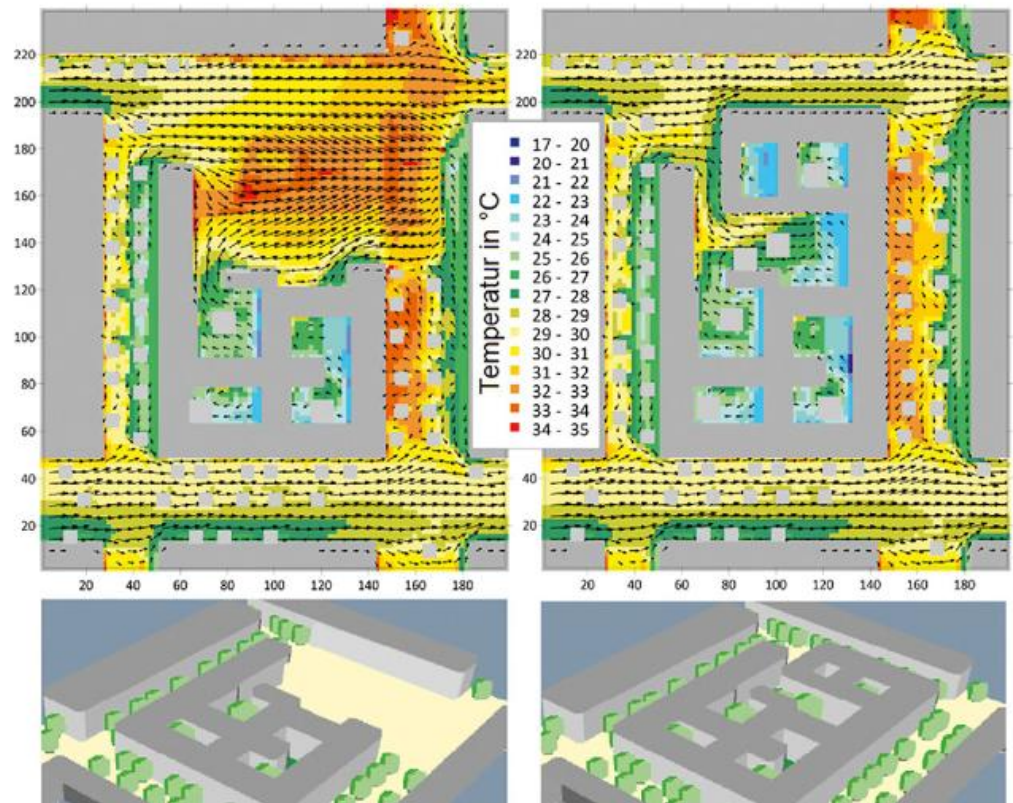


Abbildung 10-13: Berechnete mikroskalige Verteilung der Oberflächentemperatur und der Windverhältnisse (Pfeile) in einem Stadtquartier (*links*) und für einen geplanten Zustand (*rechts*). Der untere Teil zeigt die dreidimensionale Struktur von Gebäuden und Bäumen.

Darstellung wurde ein Termin in den späten Vormittagsstunden gewählt. Die Gebäude in dem Stadtquartier sind zwischen 17 m und 20 m hoch und besitzen alle ein Flachdach. Wände und Dächer sind nicht begrünt, in den Innenhöfen befinden sich Rasenflächen. Es wurden noch eine Reihe von Laubbäumen mit einer Wuchshöhe von 12 m berücksichtigt.

Die 2 m-Temperatur zeigt zu diesem Zeitpunkt große räumliche Unterschiede mit hohen Werten auf den großen Freiflächen und im Bereich der nach Süden und Osten ausgerichteten Fassaden. Im Bereich der Schattengebiete, besonders hinter den Gebäuden und in den Innenhöfen, ist die Temperatur dagegen deutlich niedriger. Beim Wind erkennt man eine starke Modifikation der aus Westen ankommenden Strömung bei jedem individuellen Gebäude. Entlang der West-Ost orientierten Straßen wird die Strömung kanalisiert, was zu relativ hohen Geschwindigkeiten führt. Auch auf dem großen freien Platz im nördlichen Teil des Simulationsgebietes ist die Windgeschwindigkeit hoch. Im Lee der quer angeströmten Bauten erkennt man Rückströmgebiete, die zusätzlich durch den vorhandenen Baumbestand modifiziert werden. In den Innenhöfen bilden sich windschwache Zonen aus.

Ein großer Vorteil der Anwendung numerischer Simulationsmodelle ist die Möglichkeit, die Auswirkungen von Nutzungs- und Bebauungsänderungen auf die Verteilung der meteorologischen Variablen zu studieren. Zu diesem

Zweck werden Simulationen für den Ist-Zustand und für geplante Situationen durchgeführt und durch Vergleich der Ergebnisse für ansonsten identische Rahmenbedingungen können plausible Rückschlüsse auf mögliche Effekte gezogen werden. Um diese Vorgehensweise zu demonstrieren, wird ein Szenario definiert, bei dem der freie Platz im nördlichen Teil bebaut wird und zusätzliche Bäume entlang der Straßen eingefügt werden. Die Ergebnisse für dieses Szenario sind im rechten Teil von Abbildung 10-13 gezeigt. Man erkennt sehr deutlich die großen Auswirkungen auf die Temperatur, wobei die Effekte nicht nur auf die unmittelbare Umgebung der Nutzungsänderungen beschränkt bleiben, sondern auch weit darüber hinaus gehen. Das Areal ist nun deutlich kühler und der mittlere Wind sehr markant abgeschwächt. Die Strömung wird um das neue Gebäude herumgeführt und in den Innenhöfen stark verzögert.

Auch die Auswirkungen des Klimawandels kann bei solchen Studien Berücksichtigung finden, indem man nicht nur das Bebauungsszenario verändert, sondern auch die meteorologische Situation, in der das Simulationsgebiet eingebettet ist.

4.3.3 Weitergehende Simulationen

Die Ergebnisse von mesoskaligen und insbesondere auch von mikroskaligen Simulationen können genutzt werden, um weitere stadtklimatisch relevante Studien durchzuführen. Die Modelle liefern die Grunddaten beispielsweise auch für human-biometeorologische Untersuchungen bzw. für die Berechnung der Ausbreitung von Luftbeimengungen. Für derartige Folgeuntersuchungen muss das Grundgleichungssystem um problemspezifische Gleichungen erweitert werden. Bei den human-biometeorologischen Untersuchungen wird neben Wind, Lufttemperatur und Feuchte noch die Strahlungstemperatur

benötigt, um Kenngrößen wie PET (physiologisch äquivalente Temperatur) oder UTCI (*Universal Thermal Climate Index*; MATZARAKIS 2023) zu berechnen. Mithilfe von Agentenmodellen, bei denen sich eine Vielzahl von fiktiven Stadtbewohnern in der berechneten Stadtatmosphäre bewegen, können damit urbane Bereiche identifiziert werden, in denen hohe thermische Belastungen auftreten. Diese Gebiete können dann bei der Realisierung von Anpassungsmaßnahmen wie Dach- oder Fassadenbegrünungen besonders ertüchtigt werden. Auch hier unterstützt die Durchführung mikroskaliger Simulationen, Art, Umfang und Ort der Anpassung festzulegen (GROSS 2012).

Die Stadtatmosphäre unterscheidet sich vom Umland auch durch eine signifikante Veränderung in der Zusammensetzung der Luft. Durch die städtischen Emittenten wie Verkehr, Hausbrand und Industrie werden Stoffe in die Atmosphäre eingetragen, die bei einer hohen Konzentration zu Gesundheitsgefahren führen. Die Verteilung dieser Stoffe im urbanen Bereich kann über eine Ausbreitungsrechnung mit zusätzlichen Gleichungen für die entsprechende Anzahl zu berücksichtigender Luftbeimengungen ermittelt werden. Die mit Stadtklimamodellen berechneten lokalen Wind- und Turbulenzverhältnisse verteilen die Schadstoffe, die bei ihrem Aufenthalt in der Atmosphäre gegebenenfalls auch noch untereinander chemisch reagieren können.

Mit einem LES-Modell wie PALM-4U kann eine solche Ausbreitung sehr detailliert in ihrem zeitlichen Verlauf berechnet werden. In Abbildung 10-14 ist ein Beispiel für eine momentane Schadstoffwolke über einer Stadt gezeigt. RANS-Modelle können diesen Detaillierungsgrad nicht erreichen, sondern berechnen Mittelwerte. Solche über eine Stunde berechneten Mittelwerte werden aber auch benötigt, um die simulierten lokalen Konzentrationen mit den entsprechenden gesetzlichen Grenzwerten vergleichen

und auf diese Art Belastungsgebiete innerhalb der Stadt identifizieren zu können.

Die Palette von weitergehenden Untersuchungen auf der Basis der simulierten stadtklimatischen Parameter kann beliebig erweitert werden. So kann die Wurf- und Bruchgefahr einzelner Stadtbäume ebenso abgeschätzt werden wie die Kartierung von Windkomfortzonen oder auch die Auswirkungen verkehrslenkender Maßnahmen zur Verkehrsberuhigung der Innenstädte wie die Ausbreitung von Straßenlärm.



Abbildung 10-14: Mit PALM-4U berechnete Ausbreitung einer Schadstoffwolke über einer Stadt (aus GRONEMEIER et al. 2017).

5 Schlussbemerkungen

Für Messungen in Städten kommt heute eine große Auswahl meteorologischer in-situ- und Fernerkundungsmess-techniken zur Anwendung. Weltweit dienen zum Teil aufwendige Experimente in vielen Städten zum besseren Verständnis der meteorologischen Bedingungen einschließlich der Ausbreitungsbedingungen von Luftbeimengungen in Städten (GRIMMOND und WARD 2021, SCHLÜNZEN et al. 2022) aber auch der Bereitstellung von Eingangs- und Validierungsdaten für Windkanal- und Modellstudien. Da die städtische Überwärmung in Mitteleuropa eine der größten Herausforderungen des Klimawandels mit zum Teil sehr hohen Temperaturen ist – unter anderem auch nachts – und damit beachtliche gesundheitliche Folgen verursacht, sind flächenhafte und möglichst kontinuierlich anfallende Daten sehr wichtig. Das gilt insbesondere für innerstädtische Planungsvorhaben und Klimagutachten, bei denen teilweise Messfahrten zur Anwendung kommen. Zumindest in den größeren Städten baut der Deutsche Wetterdienst sein Netz an Stadtklimastationen aus, durchaus ergänzt von vielen universitären Stationen. Diese können als zuverlässige Referenzstationen dienen, um mittels Crowdsourcing flächendeckende Beobachtungsdaten zu erhalten. Die Organisation derartiger Netze ist eine zunehmende Aufgabe örtlicher Umweltbehörden, aber auch eine große Chance, umfassende Datenbasen zu erhalten und die Bevölkerung in die Analyse des Stadtklimas miteinzubeziehen und für die Risiken durch den Klimawandel zu sensibilisieren.

Physikalische Modellierung bzw. die Modellierung atmosphärischer Strömungs- und Transportprozesse in Grenzschichtwindkanälen kann einen Beitrag zur Untersuchung stadtklimatischer Problemstellungen leisten. Bei sachgerechter Durchführung liefert die turbulenz- und hindernisauflösende Simulation urbaner Strömungs- und Transportprozesse insbesondere auf der lokalen bzw. Rezeptor-Skala im unmittelbaren Einflussbereich von Gebäuden und anderen Strömungshindernissen räumlich und zeitlich hochaufgelöste Informationen zu stadtklimatisch relevanten Größen. Im Laborversuch können die mittleren Versuchsrandbedingungen kontrolliert eingestellt und über ausreichend lange Zeiträume konstant gehalten werden und die Erfassung statistisch repräsentativer Datenensembles ist auch für transiente Phänomene möglich. Nicht nur diesbezüglich kann die physikalische Modellierung korrespondierende Naturmessungen und numerische Modellierungen ergänzen und den für das Verständnis und die Beschreibung stadtklimatischer Prozesse und Phänomene erforderlichen Datenfundus erweitern. Auch für eine Reihe praktischer Problemstellungen wie Untersuchungen zum Windkomfort im Fußgängerbereich oder bei der Bestimmung des Einflusses von Einzelgebäuden auf die Stadtbelüftung stellt die physikalische Modellierung effiziente und erprobte Untersuchungsmethoden bereit.

Numerische Simulationsmodelle sind geeignete Werkzeuge, um stadtklimatische Fragestellungen zu bearbeiten.

Stehen entsprechende Eingangsdaten mit einer hohen räumlichen Auflösung zur Verfügung, dann können neben Temperatur, Feuchte und Wind noch weitere, problemspezifische Größen berechnet werden. Entsprechende Untersuchungen können nicht nur für den Ist-Zustand erfolgen, sondern auch für beliebige Nutzungs- und Bebauungsänderungen sowie unter Einbeziehung der Veränderungen aufgrund des globalen Klimawandels.

Es stehen derzeit eine große Anzahl meso- und mikroskaliger Modelle für praxisnahe Anwendungen zur Verfügung. Kurz- bis mittelfristig wird mit dem frei verfügbaren LES-Modell PALM-4U ein Stadtklimamodell eingesetzt werden können, das – entsprechende Rechnerressourcen vorausgesetzt – in der Lage ist, selbst sehr große Städte mit einer gebäudeauflösenden Gitterweite zu untersuchen. Dieses Modell wird kontinuierlich weiterentwickelt und beinhaltet in der Endausbaustufe eine große Anzahl von Optionen, die es zulässt, eine Vielzahl von Fragestellungen mit hoher Komplexität zu bearbeiten.

Literatur

- ABE, M., 1941: Mountain Clouds, Their Forms and Connected Air Currents. Part II. *Bulletin of the Central Meteorological Observatory* 7.
- ATHANASOPOULOU, E., SPEYER, O., BRUNNER, D., VOGEL, H., VOGEL, B., MIHALOPOULOS, N., GERASOPOULOS, E., 2017: Changes in domestic heating fuel use in Greece: effects on atmospheric chemistry and radiation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 10597-10618, doi: 10.5194/acp-17-10597-2017.
- AUVINEN, M., JÄRVI, L., HELLSTEN, A., RANNIK, Ü., VESALA, T., 2017: Numerical framework for the computation of urban flux footprints employing large-eddy simulation and Lagrangian stochastic modeling. *Geosci. Model Dev.* 10, 4187-4205, doi: 10.5194/gmd-10-4187-2017.
- BANGE, J., REUDER, J., PLATIS, A., 2021: Unmanned aircraft systems. In: Springer Handbook of Atmospheric Measurements, FOKEN, T. (Hrsg.), Springer, 1331-1348, doi: 10.1007/978-3-030-52171-4_49.
- BONN, A., RICHTER, A., VOHLAND, K., et al., 2016: Grünbuch Citizen Science Strategie 2020 für Deutschland. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, Leipzig, Museum für Naturkunde Berlin, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung (MfN), Berlin-Brandenburgisches Institut für Biodiversitätsforschung (BBIB), Berlin, Leipzig, 42 S.
- BUDDE, M., 2021: Crowdsourcing. In: Springer Handbook of Atmospheric Measurements, FOKEN, T. (Hrsg.), Springer, 1201-1233, doi: 10.1007/978-3-030-52171-4_44.
- BUTTSTÄDT, M., SACHSEN, T., KETZLER, G., MERBITZ, H., SCHNEIDER, C., 2011: A new approach for

- highly resolved air temperature measurements in urban areas. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **4**, 1001-1019, doi: 10.5194/amtd-4-1001-2011.
- CHRISTEN, A., VOGT, R., 2004: Energy and radiation balance of a central European city. *Int. J. Climatol.* **24**, 1395-1421, doi: 10.1002/joc.1074.
- EICHHORN, J., KNIFFKA, A., 2010: The Numerical Flow Model MISKAM: State of development and evaluation of the basic version. *Meteorologische Zeitschrift* **19**, 81-90, doi: 10.1127/0941-2948/2010/0425.
- FEICHTINGER, M., DE WIT, R., GOLDENITS, G., KOLEJKA, T., HOLLÓSI, B., ŽUVELA-ALOISE, M., FEIGL, J., 2020: Case-study of neighborhood-scale summertime urban air temperature for the City of Vienna using crowd-sourced data. *Urban Climate* **32**, 100597, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100597.
- FENNER, D., BECHTEL, B., DEMUZERE, M., KITTNER, J., MEIER, F., 2021: CrowdQC+ – A Quality-Control for Crowdsourced Air-Temperature Observations Enabling World-Wide Urban Climate Applications. *Frontiers in Environmental Science* **9**, doi: 10.3389/fenvs.2021.720747.
- FLASSAK, T., 2018: Evaluierung des prognostischen mesoskaligen Modells ProWiMo auf der Basis der Richtlinie VDI 3783 Blatt 7. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **78**, 43-51.
- FOKEN, T., 2016: Angewandte Meteorologie: Mikrometeorologische Methoden, 3. Aufl., *Springer Spektrum*, 394 S., doi: 10.1007/978-3-642-25525-0.
- FOKEN, T. (Hrsg.), 2021: Springer Handbook of Atmospheric Measurements. *Springer*, 1748 S., doi: 10.1007/978-3-030-52171-4.
- FOKEN, T., BECHTEL, B., BUDDE, M., FENNER, D., KNECHTEL, R., MEIER, F., 2022: Crowdsourcing als Möglichkeit zur Gewinnung atmosphärischer Messdaten. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **82**, 209-219.
- FOKEN, T., MÜLLER, W.J., 2020: Wie und wo misst man in der Atmosphäre. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **80**, 300-304.
- GOLDBACH, A., KUTTLER, W., 2013: Quantification of turbulent heat fluxes for adaptation strategies within urban planning. *Int. J. Climatol.* **33**, 143-159, doi: 10.1002/joc.3437.
- GRAWE, D., SCHLÜNZEN, K.H., PASCHEKE, F., 2013: Comparison of results of an obstacle resolving microscale model with wind tunnel data. *Atmospheric Environment* **79**, 495-509, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.039.
- GRIMMOND, S., WARD, H.C., 2021: Urban Measurements and Their Interpretation. In: Springer Handbook of Atmospheric Measurements, FOKEN, T. (Hrsg.), *Springer*, 1391-1423, doi: 10.1007/978-3-030-52171-4_52.
- GRONEMEIER, T., BÖSKE, L., KNOOP, H., MARONGA, B., MÜLLER, R., 2017: Urban pollution dispersion – large-eddy simulation of a heavy atmospheric pollution release event in an urban environment. Leibniz Universität Hannover, Institut für Meteorologie und Klimatologie (Hrsg.), doi: 10.5446/32921.
- GROSS, G., 2012: Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments. *Meteorologische Zeitschrift* **21**, 399-412, doi: 10.1127/0941-2948/2012/0363.
- GROSS, G., 2019: On the range of boundary layer model results depending on inaccurate input data. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 225-234, doi: 10.1127/metz/2019/0952.
- HOFFMANN, P., SCHOETTER, R., SCHLUENZEN, K.H., 2018: Statistical-dynamical downscaling of the urban heat island in Hamburg, Germany. *Meteorologische Zeitschrift* **27**, 89-109, doi: 10.1127/metz/2016/0773.
- HUTJES, R.W.A., VELLINGA, O.S., GIOLI, B., MIGLIETTA, F., 2010: Dis-aggregation of airborne flux measurements using footprint analysis. *Agric. For. Meteorol.* **150**, 966-983, doi: 10.1016/j.agrformet.2010.03.004.
- KANDA, M., MORIWAKI, R., ROTH, M., OKE, T., 2002: Area-averaged sensible heat flux and a new method to determine zero-plane displacement length over an urban surface using scintillometry. *Boundary-Layer Meteorol.* **105**, 177-193, doi: 10.1023/A:1019668424982.
- KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.
- LECLERC, M.Y., FOKEN, T., 2014: Footprints in Micrometeorology and Ecology. *Springer*, 239 S., doi: 10.1007/978-3-642-54545-0.
- MARONGA, B., BANZHAF, S., BURMEISTER, C., et al., 2020: Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific model development* **13**, 1335-1372, doi: 10.5194/gmd-13-1335-2020.
- MARQUÈS, E., MASSON, V., NAVEAU, P., MESTRE, O., DUBREUIL, V., RICHARD, Y., 2022: Urban Heat Island Estimation from Crowdsensing Thermometers Embedded in Personal Cars. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **103**, E1098-E1113, doi: 10.1175/BAMS-D-21-0174.1.
- MATZARAKIS, A., 2023: Hitze in Städten – Quantifizierung, Warnsysteme und Hitzeaktionspläne zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 61-70.
- MAUDER, M., FOKEN, T., AUBINET, M., IBROM, A., 2021: Eddy-Covariance Measurements. In: Springer Handbook of Atmospheric Measurements, FOKEN, T. (Hrsg.), *Springer*, 1473-1504, doi: 10.1007/978-3-030-52171-4_55.
- MAUDER, M., FOKEN, T., CUXART, J., 2020: Surface Energy Balance Closure over Land: A Review. *Boundary-Layer Meteorol.* **177**, 395-426, doi: 10.1007/s10546-020-00529-6.
- MULLER, C.L., CHAPMAN, L., GRIMMOND, C.S.B., YOUNG, D.T., CAI, X., 2013: Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. *Int. J. Climatol.* **33**, 1585-1600, doi: 10.1002/joc.3678.
- OKE, T.R., MILLS, G., CHRISTEN, A., VOOGT, J.A., 2017: Urban Climates. *Cambridge University Press*, 525 S., doi: 10.1017/9781139016476.
- OLIVEIRA, B.R.F., KEIZER, J.J., FOKEN, T., 2022:

- Changes of the aerodynamic characteristics of a flux site after an extensive windthrow. *Biogeosci.* **19**, 2235-2243, doi: 10.5194/bg-19-2235-2022.
- PARLOW, E., 2021: Regarding Some Pitfalls in Urban Heat Island Studies Using Remote Sensing Technology. *Remote Sensing* **13**, 3598, doi: 10.3390/rs13183598.
- PARLOW, E., FOKEN, T., 2021: Ground-based mobile measurement systems. In: Springer Handbook of Atmospheric Measurements, FOKEN, T. (Hrsg.), Springer, 1351-1367, doi: 10.1007/978-3-030-52171-4_50.
- PLATE, E.J. (Hrsg.), 1982: Engineering Meteorology – Fundamentals of Meteorology and Their Applications to Problems in Environmental and Civil Engineering. Elsevier Scientific Publishing Company, ISBN 0-444-41972-1.
- PLATE, E.J., LIN, C.W., 1966: Investigations of the Thermally Stratified Boundary Layer. Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- RAU, M., PLATE, E.J., 1995: Wind Tunnel Modelling of Convective Boundary Layers. In: Wind Climate in Cities. CERMAK, J.E., DAVENPORT, A.G., PLATE, E.J., VIEGAS, D.X. (Hrsg.). NATO ASI Series **277**, Springer, Dordrecht, doi: 10.1007/978-94-017-3686-2_20.
- RIGO, G., PARLOW, E., 2007: Modelling the ground heat flux of an urban area using remote sensing data. *Theor. Appl. Climat.* **90**, 185-199, doi: 10.1007/s00704-006-0279-8.
- ROTACH, M.W., VOGT, R., BERNHOFER, C., et al., 2005: BUBBLE – an urban boundary layer meteorology project. *Theor. Appl. Climat.* **81**, 231-261, doi: 10.1007/s00704-004-0117-9.
- SCHLÜNZEN, H., GRIMMOND, S., BAKLANOV, A. (Hrsg.), 2022: Guidance to Measuring, Modelling and Monitoring the Canopy Layer Urban Heat Island (CL-UHI), Draft. World Meteorological Organization, 97 S.
- SEDLMEIER, K., TINZ, B., 2023: Wind in der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 39-49.
- SIEVERS, U., 2012: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3. Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **240**.
- SIMON, H., SOHNI, F., SINSEL, T., BRUSE, M., 2018: Downscaling Climate Models: Running Nested Simulations In The Microclimate Model ENVI-met A Case Study Using WUDAPT2ENVI-met. Conference Paper, PLEA Hong Kong, Abruf am 21.04.2023, URL: www.researchgate.net/publication/329714822.
- SNYDER, W.H., 1981: Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion. Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Report 600/8-81-009.
- THEEUWES, N.E., RONDA, R.J., HARMAN, I.N., CHRISTEN, A., GRIMMOND, C.S.B., 2019: Parameterizing Horizontally-Averaged Wind and Temperature Profiles in the Urban Roughness Sublayer. *Boundary-Layer Meteorol.* **173**, 321-348, doi: 10.1007/s10546-019-00472-1.
- TOWNSEND, A.A., 1956: The Structure of Turbulent Shear Flow. Institute of Technology for the Citizen, Cambridge University Press.
- VDI, 2022: VDI 3783 Blatt 12. Umweltmeteorologie – Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht – Windkanalanwendungen. (Gründruck) Beuth Verlag, Berlin, 68 S.
- WARD, H.C., 2017: Scintillometry in urban and complex environments: a review. *Measurement Science and Technology* **28**, 064005, doi: 10.1088/1361-6501/aa5e85.
- WMO, 2018: Guide to Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8, Volume I – Measurement of Meteorological Variables. World Meteorological Organization, 548 S.

Kontakt

PROF. DR. THOMAS FOKEN
Universität Bayreuth
Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung
95440 Bayreuth
thomas.foken@uni-bayreuth.de

PROF. DR. EBERHARD PARLOW
Universität Basel
Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung
Department Umweltwissenschaften
Klingelbergstr. 27
4056 Basel
Schweiz
eberhard.parlow@unibas.ch

PROF. DR. GÜNTER GROSS
Leibniz Universität Hannover
Institut für Meteorologie und Klimatologie
Herrenhäuser Strasse 2
30419 Hannover
gross@meteo.uni-hannover.de

PROF. DR. BERND LEITL
Universität Hamburg
Meteorologisches Institut
Bundesstrasse 55
20146 Hamburg
bernd.leitl@uni-hamburg.de

J. BAUMÜLLER, L. KATZSCHNER

11 Stadtklima und Klimaanpassung in der städtebaulichen Planung

Urban climate and climate adaptation in urban planning

Zusammenfassung

Mit der Novellierung des Deutschen Baugesetzbuchs im Jahr 2011 wurde die Klimaanpassung als wichtiger Belang in der Bauleitplanung verankert. Durch das geänderte Planungsrecht sind die gesetzlichen Möglichkeiten gegeben, die Klimaanpassung bei Planungsvorhaben auf allen Ebenen zu berücksichtigen. Um die Umsetzung stadtklimatischer Belange und der Klimaanpassung hinreichend berücksichtigen zu können, ist es notwendig, auf die Stadt bezogene entsprechende klimatische Bewertungen zu erarbeiten. Da man sich schon lange in Deutschland mit stadtklimatischen Untersuchungen befasst, ist es möglich, auf ein großes Knowhow zurückzugreifen: Seien dies Messungen oder Modelle, die es ermöglichen, flächendeckende klimatische Aussagen zu treffen und auch in Karten Planungshinweise auf allen Planungsebenen in Klimaanalysekarten darzustellen.

Summary

With the amendment of the German Building Code in 2011, climate adaptation was anchored as an important concern in urban land use planning. The amended planning law provides the legal possibilities to take climate adaptation into account in planning projects at all levels. In order to be able to sufficiently consider the implementation of urban climatic concerns and climate adaptation, it is necessary to develop appropriate climatic bases in relation to the city. Since urban climatic studies have been carried out in Germany for a long time, it is possible to draw on a great deal of know-how: be it measurements or computer simulations, which make it possible to make area-wide climatic statements and also to present planning recommendations in maps at all planning levels.

1 Einleitung

Seit man erkannt hat, dass der globale Klimawandel auch mit den geplanten Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgase nicht gestoppt, sondern nur gedämpft werden kann, hat die Diskussion zur Klimaanpassung in den Städten in den letzten Jahren stark zugenommen. Im Jahr 1972 veröffentlichte der „Club of Rome“ unter dem Titel „Grenzen des Wachstums“ die Ergebnisse einer Computersimulation zur Zukunft der Weltwirtschaft. Ausgangspunkt der Studie war es zu zeigen, dass das aktuelle individuelle lokale Handeln aller globale Auswirkungen hat (MEADOWS et al. 1972). Dies war auch die Zeit, in der der Begriff Umweltschutz Eingang fand in die parlamentarische Debatte und in die Presse. Im Juni 1972 fand in Stockholm die 1. Umweltkonferenz der Vereinten Nationen (UN) statt und auch in Deutschland gab es eine Aufbruchstimmung in Sachen Umweltschutz. Das Bundesimmissionsschutzgesetz wurde 1973 verabschiedet, indem auch das Vorsorgeprinzip enthalten war. Der Schwerpunkt zu dieser Zeit lag

bei der Luftreinhaltung infolge hoher Schwefeldioxid- und Staubbelastrungen. Klima und Luft wurden Planungsbelange im Bundesbaugesetz von 1976 (BBauG 1976).

Die Bundesregierung verabschiedete im Jahr 2008 die „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (DAS 2008) mit folgender Begründung: „Auch bei einem begrenzten Temperaturanstieg von 2 Grad werden die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgen des bereits begonnenen Klimawandels spürbar bleiben. Bei der Einhaltung dieses Ziels wird davon ausgegangen, dass die Folgen durch geeignete und rechtzeitige Anpassungsmaßnahmen aufzufangen sind und schwere Folgen vermieden werden können“. Die Unterschreitung der 2-Grad-Grenze wurde 2015 in Paris (COP21) als Ziel beschlossen.

Im Aktionsplan „Anpassung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ aus dem Jahr 2011 ist als eine Maßnahme die rechtliche Rahmensetzung durch den Bund genannt. Hier werden Vorhaben benannt, mit denen die Bun-

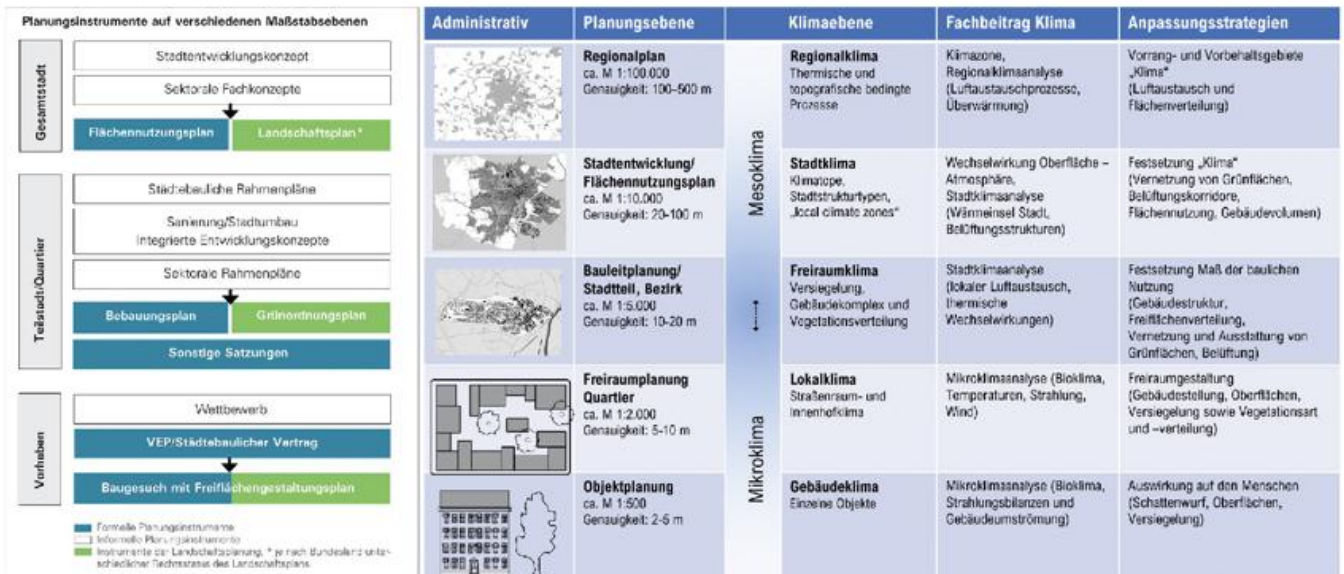


Abbildung 11-1: Kommunale Planungsebenen in Deutschland mit dazugehörigen stadtklimatischen Fragestellungen (aus BAUMÜLLER 2018).

desregulierung in den Bereichen „rechtliche oder technische Rahmensetzung“, „Normung“ sowie „Förderpolitik“ Anreize und Grundlagen zur Anpassung anbietet bzw. prüfen wird.

Im zweiten Statusbericht des *Urban Climate Change Research Network „Climate Change and Cities“* (ROSEN-ZWEIG et al. 2018) wird die Betroffenheit und die Anpassungsnotwendigkeit in Städten untermauert. Somit war klar, dass das deutsche Planungsrecht diesen neuen Anforderungen angepasst werden musste.

2 Planungsrecht

Eine Konsequenz aus dem Aktionsplan zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel war unter anderem die Änderung des Baugesetzbuches (BauGB 2011/13) mit der gesetzlichen Vorgabe, die Klimaanpassung (neben dem Klimaschutz im Sinne der Einsparung von CO₂) als einen wichtigen Belang auf allen Planungsebenen zu berücksichtigen.

Durch die Aufnahme der Klimaanpassung in §1 des BauGB wird die Klimaanpassung ein städtebauliches Leitbild und ein wichtiger Abwägungsbelang. Um den Belang der Klimaanpassung zu unterstreichen, wurde in § 1a folgender Absatz 5 angefügt:

„(5) Den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, Rechnung getragen werden.“

Zu beachten ist jedoch, dass die Klimaanpassung nur ein Gesichtspunkt unter vielen ist und in der Abwägung zwar berücksichtigt werden muss, aber keinen absoluten Vorrang hat. Hier zeigt sich der Mangel an einem eigenen Gesetz zum Klima mit der Festlegung entsprechender thermischer und anderer Grenzwerte.

Nach § 5 BauGB (Inhalt des Flächennutzungsplans) können die Bedürfnisse einer Gemeinde gesamtstädtisch in den Grundzügen dargestellt werden, unter anderem mit Anlagen, Einrichtungen und sonstigen Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen. Durch das Baugesetzbuch in der Fassung vom 30. Juli 2011 wurde die Klimaanpassung auch in Bezug auf die Stadtsanierung (§ 136) und den Stadtbau (§ 171a BauGB) eingeführt, was insofern bedeutungsvoll ist, da in unseren Städten neue Bebauungspläne eher selten erstellt werden.

Die Planungshoheit in den Städten obliegt der Stadtverwaltung und findet auf verschiedenen Planungsebenen statt.

2.1 Kommunale Planungsebenen

Das deutsche Planungsrecht unterscheidet in Städten zwei rechtlich verbindliche Planungsebenen (Abb. 11-1):

- Der Flächennutzungsplan (Maßstab z. B. 1:10.000) regelt die prinzipielle Nutzung der Stadtflächen in der Gesamtstadt.
- Der Bebauungsplan legt kleinräumig (Maßstab z. B. 1:500) die Bebauung im Detail fest.

Ergänzt werden diese rechtsverbindlichen Pläne durch sogenannte informelle Pläne, die den Planungsebenen angepasst sind, wie der Landschaftsplan zum Flächennutzungsplan oder der Grünordnungsplan zum Bebauungsplan (§ 11 BNatSchG 2009).

Bei Klimaanpassungsstrategien, die für Städte immer häufiger erstellt werden, handelt es sich meist um längerfristige Strategieplanungen; deshalb kommt diesen zusätzlichen informellen Planungen in der Zukunft eine große Bedeutung zu. Auf gesamtstädtischer Ebene können dies Stadtentwicklungskonzepte wie in Berlin sein (STEP KLIMA 2011) und bei der stadtteilbezogenen Pla-

nung Rahmenpläne wie beispielsweise für Talgrund West in Stuttgart (LHS 2020).

Entscheidend ist, dass die Berücksichtigung informeller Planungen vom Stadtrat (Gemeinderat) nach § 1 Abs. 6, Nr. 11 BauGB als „sonstige städtebauliche Planung“ beschlossen werden. Mit diesem Beschluss tritt zum einen eine gewisse Selbstverpflichtung der Gemeinde ein, zum anderen stärkt es der Verwaltung den Rücken bei der Behandlung der Klimaanpassung im Planungsprozess. Diese Pläne sind jedoch nicht rechtsverbindlich!

Entscheidend für die Umsetzung klimatischer Aspekte in der Planung sind die Festsetzungen in den rechtsverbindlichen Planungsebenen.

2.2 Flächennutzungsplan

Klimarelevante Festsetzungen und Kennzeichnungen im Flächennutzungsplan sind unter anderem

- Anlagen, Einrichtungen und sonstige Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen,
- Grünflächen wie Parkanlagen, Dauerkleingärten, Sport-, Spiel-, Zelt- und Badeplätze, Friedhöfe,
- Flächen, die im Interesse des Hochwasserschutzes und der Regelung des Wasserabflusses freizuhalten sind,
- Flächen für die Landwirtschaft und den Wald,
- Sicherung von Luftleitbahnen,
- Bereiche höherer bioklimatischer Belastung und
- Sicherung durchgrünter Wohngebiete.

Als Beispiel soll hier der Flächennutzungsplan der Stadt Esslingen (Abb. 11-2) genannt werden. Der Flächennutzungsplan von Esslingen 2030 ist einer der ersten, in den klimatische Hinweise direkt aufgenommen wurden.

2.3 Bebauungsplan

Für die Umsetzung von Maßnahmen, also Festsetzungen nach dem BauGB, ist § 9 „Inhalt des Bebauungsplans“ maßgebend. Begründet mit § 9 können vielzählige Festsetzungen getroffen werden, die der Klimaanpassung direkt oder indirekt dienen.

§ 9 Inhalt des Bebauungsplans

(1) Im Bebauungsplan können aus städtebaulichen Gründen festgesetzt werden:

1. die Art und das Maß der baulichen Nutzung;
2. die Bauweise, die überbaubaren und die nicht überbaubaren Grundstücksflächen sowie die Stellung der baulichen Anlagen;
3. für die Größe, Breite und Tiefe der Baugrundstücke Mindestmaße und aus Gründen des sparsamen und schonenden Umgangs mit Grund und Boden für Wohnbaugrundstücke auch Höchstmaße;
- ...
10. die Flächen, die von der Bebauung freizuhalten sind, und ihre Nutzung
- ...
15. die öffentlichen und privaten Grünflächen, wie Park-



Abbildung 11-2: Ausschnitt aus dem Flächennutzungsplan 2030 der Stadt Esslingen mit Klima-Kennzeichnungen (ursprünglicher Maßstab 1:10.000). W: Wohnbauflächen, M: gemischte Bauflächen, S: Sonderbauflächen (Abbildung: Stadt Esslingen).

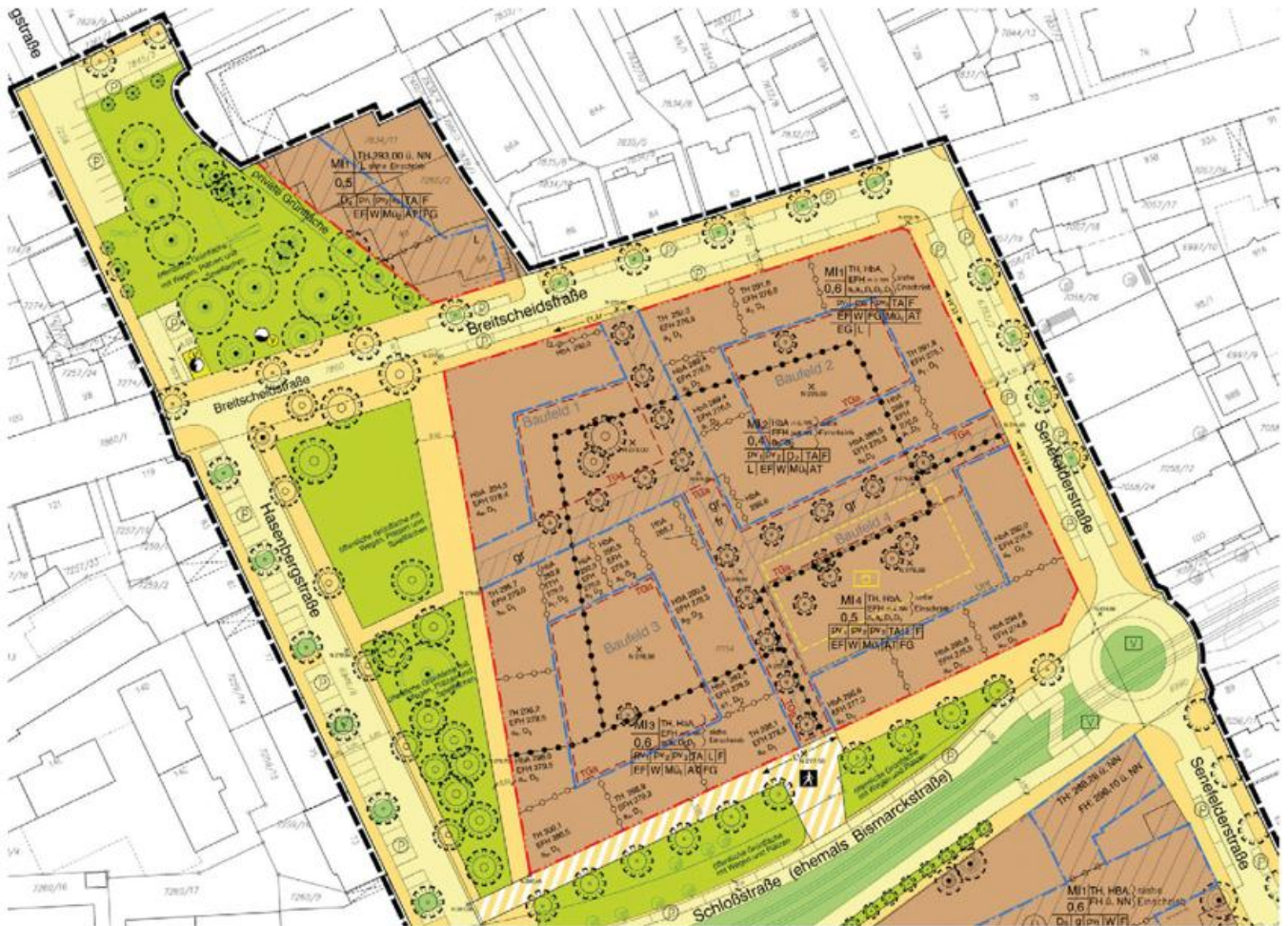


Abbildung 11-3: Ausschnitt des Bebauungsplans Schloßstraße (ehemals Bismarckstraße)/Hasenbergstraße/Breitscheidstraße/Senefelderstraße in Stuttgart-West (Stgt 258), ursprünglicher Maßstab 1:500 (aus LHS 2016).

anlagen, Dauerkleingärten, Sport-, Spiel-, Zelt- und Badeplätze, Friedhöfe;

16. a) die Wasserflächen und die Flächen für die Wasserwirtschaft,
 - b) die Flächen für Hochwasserschutzanlagen und für die Regelung des Wasserabflusses,
 - c) Gebiete, in denen bei der Errichtung baulicher Anlagen bestimmte bauliche oder technische Maßnahmen getroffen werden müssen, die der Vermeidung oder Verringerung von Hochwasserschäden einschließlich Schäden durch Starkregen dienen, sowie die Art dieser Maßnahmen,
 - d) die Flächen, die auf einem Baugrundstück für die natürliche Versickerung von Wasser aus Niederschlägen freigehalten werden müssen, um insbesondere Hochwasserschäden, einschließlich Schäden durch Starkregen, vorzubeugen;
- ...
25. für einzelne Flächen oder für ein Bebauungsplangebiet oder Teile davon sowie für Teile baulicher Anlagen mit Ausnahme der für landwirtschaftliche Nutzungen oder Wald festgesetzten Flächen
 - a) das Anpflanzen von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen,

b) Bindungen für Bepflanzungen und für die Erhaltung von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen sowie von Gewässern.

...

Eine ausführliche Auflistung von Handlungsempfehlungen, Maßnahmen und Umsetzungs-Möglichkeiten findet sich in dem „Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern“ (TUM 2017). Ergänzt werden können klimarelevante Bestimmungen durch Ortsbausatzungen, wie das Verbot von Schottergärten in Nürnberg. Auch ist es möglich, durch städtebauliche Verträge klimarelevante Maßnahmen zu erreichen.

Der exemplarische Bebauungsplan aus Stuttgart-West (Abb. 11-3) sieht vor, das Grünvolumen zwischen den Gebäuden zu maximieren. Unbebaute öffentliche und private Flächen sollen weitgehend entsiegelt hergestellt und mit Bäumen und Grünpflanzen ausgestattet werden (LHS 2016). Es wurden Festsetzungen zur Pflanzverpflichtung getroffen, Baumstandorte (gestrichelte Kreise) festgelegt sowie der Einsatz wasserdurchlässiger Beläge festgeschrieben. Die Flachdächer sind zu begrünen, soweit nicht flächig integrierte Photovoltaik Elemente vorgesehen sind.

3 Bewertung stadtklimatischer Belange

3.1 Umsetzungsebenen

Um die Umsetzungen stadtklimatischer Belange in der Planung ausreichend berücksichtigen zu können, ist eine Stadtklimaanalyse die entscheidende Grundlage, welche auch schon weltweit angewandt wird (NG 2015, REN et al. 2010). In dieser werden räumliche Klimawirkungen dargestellt, da eine Stadt als hochkomplexes Gebilde die natürliche Erdoberfläche in vielfacher Hinsicht durch bauliche Tätigkeit ändert und sich damit auf das Stadtklima wirkt. Eingriffe in die Strömungsdynamik der städtischen Grenzschicht und die Verwendung meist künstlicher Baumaterialien führen zu hoher Wärmespeicherung (KUTTLER und GROSS 2023, SCHERER 2023, EMEIS 2023). Zudem kommt technisch produzierte Abwärme, die ebenso Einfluss auf die Strahlungs- und Wärmeströme haben. Diese Eigenschaften werden in den Analysen der Stadtklimakarten als einheitliche Klimatope dargestellt und bezüglich der thermischen und dynamischen Eigenschaften bewertet.

Klimatope beschreiben Gebiete mit ähnlichen mikroklimalischen Ausprägungen. Diese unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Tagesgangs der Temperatur, der Veränderung des Windfeldes, der topographischen Lage bzw. Exposition sowie insbesondere hinsichtlich der Art der realen Flächennutzung. So werden Überwärmungsräume, Belastungsräume und Luftleitbahnen räumlich eingegrenzt und können direkt in die Planung eingebunden werden. Besondere Beachtung bei der Bewertung liegt auf den unterschiedlichen mikroklimalischen Eigenschaften von Stadtquartieren. Die kleinräumigen Unterschiede thermischer Bedingungen sind für die Aufenthaltsqualität der Stadtbewohner entscheidend. Das ideale Stadtklima sollte eine hohe Inhomogenität des thermischen Komforts beinhalten, die Wahlmöglichkeiten wie beschattete Sitzmöglichkeiten oder belüftete Innenhöfe bietet. Unterschiedliche Ausprägungen können auch durch den Tagesgang der thermischen Gegebenheiten hervorgerufen werden, was in eine Bewertung mit einfließen sollte (KATZSCHNER und KUPSKI 2019).

Da durch den globalen Klimawandel auch die städtische Überwärmung an Intensität zunimmt (KUTTLER 2019), erhöht sich die Anzahl der Tage mit Hitzestress. Die Bedeutung von Abkühlungsmaßnahmen durch Verschattungen oder ausreichende Belüftung nimmt also zu (PAULEIT et al. 2023, MATZARAKIS 2023).

Stadtklimakarten sind in ihren räumlichen Grenzen in der Regel auf die politischen Grenzen abgestimmt, müssen aber auch die regionalen Zirkulationsbedingungen mitberücksichtigen. Eine Klimaanalysekarte stellt die räumlichen Klimaeigenschaften einer Bezugsfläche dar, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen. Dargestellt werden die thermischen, dynamischen sowie lufthygienischen Verhältnisse. Umgesetzt findet sich das in den Regionalplänen wieder. Im Bereich des Mesoklimas können so Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für klimatische

Belange festgelegt werden, die zum Ziel haben, den Luftaustausch nicht zu behindern oder sogar zu fördern, um die Belastungsräume zu entlasten.

Geht man auf die Ebene der Stadt, so ist die Flächennutzungsplanung relevant, da dort Flächenfestsetzungen gemacht werden können, die Bereiche für die Kalt- und Frischluftentstehung schützen. Ebenso sind indirekt die Ausweisung von Luftleitbahnen möglich durch Verbindung offener Flächen mit geringerer Rauigkeit.

Beim Mikroklima sind als Kriterien aus der Klimaanalyse die räumlichen Zuordnungen zu beachten: Maßnahmen beziehen sich auf die Reduktion der städtischen Wärmeinsel und auf die Verbesserung der Belüftungsverhältnisse und sind zudem auch auf den Tagesgang auszurichten, da Beschattung die Tagesspitzen der Temperatur abbaut. Für die nächtliche Situation sind jedoch stark abkühlende Flächen, die auch die Kaltluftproduktion fördern, entscheidend.

3.2 Handlungsfelder

Die oben beschriebenen Festsetzungen in der verbindlichen Planung müssen in nachfolgenden Schritten nicht nur auf ihre Wirkung, sondern auch in Hinblick auf ihren Einfluss auf andere stadtklimatische Eigenschaften untersucht werden. Für Bewertungen sind in den Klimaanalysen räumlich hochaufgelöste thermische und dynamische Aussagen erforderlich, welche sich aus den Indizes ableiten, um humanbiometeorologische Belastungen (Wärmebelastung, Kältestress, lufthygienische Belastung) darzustellen. Handlungsfelder sind dabei die Festlegung von Schwerpunkträumen für Ausgleichsflächen und die Bestimmung von Luftleitbahnen. Hierbei handelt es sich um (HENNINGER und WEBER 2020):

- Stadtstrukturtypisierung und Charakteristik der baulichen Dichte bezüglich der Ausbildung von Wärmeinsel und Belüftung
- Grünflächen in Bezug auf Abkühlungsleistung, Luftaustausch, Schattenwurf, Verdunstungsleistung
- Luftleitbahnen und Kaltluftabflussbahnen sowie deren räumliche Lage als Ausgleichs- und Wirkungsraum
- Auswirkung und Ausbreitung von Emissionen
- die menschliche Gesundheit, vordergründig vulnerabler Gruppen

Daraus können Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen und lufthygienischen Bedingungen mit Raumbezug abgeleitet werden:

- Verbesserung der Belüftungsförderung durch räumliche und stadtstrukturelle Anordnungen
- Schaffung von geeigneten Flächen zur nächtlichen Abkühlung
- Reduzierung der Wärmespeicherung
- Einsatz von Vegetation für Beschattung und Abkühlung
- Ausweisung regionaler Luftleitbahnen

3.3 Klimakarten

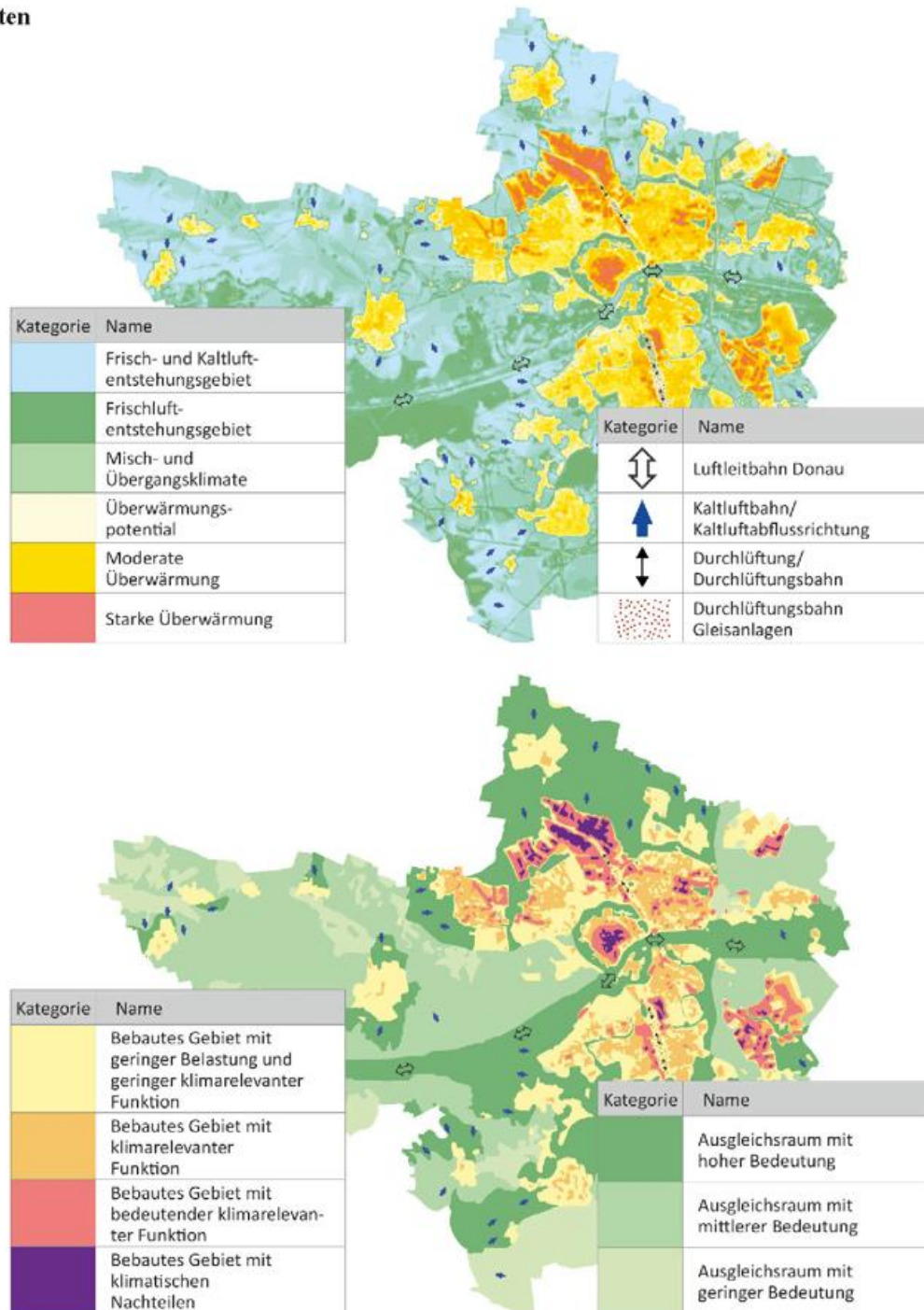


Abbildung 11-4: Klimaanalyse der Stadt Ingolstadt in Form einer Klimaanalysekarte (oben) und einer Planungshinweiskarte (unten) im 10-m-Raster (nicht maßstabsgetreu, nach INKEK 2022).

Um zu räumlichen Bewertungen zu kommen, ist es wichtig, die Klimaanalysen in zwei Schritten vorzunehmen, nämlich in der Darstellung einer Klimaanalysekarte und einer Planungshinweiskarte (Abb. 11-4).

Entsprechende Darstellungslegenden finden sich in der VDI-Richtlinie 3887 Blatt 1 (VDI 2015). Um die Planungsmaßnahmen in der Planungspraxis ausreichend zu berücksichtigen, bedarf es auf die Stadtplanungsebenen bezogene Maßnahmen, die durch technische Regeln abgesichert sind, um entsprechende Vorlagen für Planungsentscheidungen in den politischen und administrativen Gremien vorzulegen.

Aus der Planungshinweiskarte kann der Anwender in einem räumlich hochaufgelösten Muster erkennen, ob ein Plangebiet klimatisch bedeutsam ist. In den Hinweisen aus Abbildung 11-4 sind Empfehlungen, die lokal bestimmt sind, aufgenommen, worauf planerisch geachtet werden sollte. Die Darstellung der stadtklimatischen Wechselwirkungen zwischen Ausgleichs- und Lasträumen über Luftleitbahnen oder Belüftungskorridore ermöglicht es Konflikte einzuordnen. Bei unsicherer Einschätzung kann zur Erläuterung und zur Entwicklung konkreter Maßnahmen nach Identifizierung durch die Planungshinweiskarte auf die Analysekarte und auch auf einzelne thematische



Abbildung 11-5: Strategisches Vorgehen für die Anwendung einer gesamtstädtischen Klimaanalyse (eigene Darstellung).

Grundkarten (Kaltluftabflusskarte, Vegetationsverteilung oder Bebauungsdichte) zurückgegriffen werden. So ergibt sich eine Anwendungsreihenfolge, die vom Planungsstand und dem Detailierungsgrad abhängig ist und sich von der übersichtlich dargestellten Planungshinweiskarte über die vielschichtige Klimaanalysekarte bis hin zu den jeweiligen Fachthemen erstreckt.

3.4 Vorgehen

Zur Bewertung der Maßnahmen in Bezug auf thermische und dynamische Bedingungen, sowie für komplexe Darstellungen, sind im Verein Deutscher Ingenieure (VDI) weitere technische Regeln entwickelt worden, die es ermöglichen, stadtklimatische Erkenntnisse planerisch umzusetzen (Abb. 11-5). Entsprechende Beispiele sind den Themen „Klima und Planung“ (VDI 2015) sowie „Stadtentwicklung im Klimawandel“ (VDI 2020) zugeordnet. Legenden werden dort einheitlich und vergleichbar beschrieben und in Planungsempfehlungen räumlich dargestellt.

Vor allem die Bewertung von Frisch- und Kaltluftabflüssen ist planerisch relevant. Eine Methode dazu ist die Klassifi-

zierung des kaltluftdurchflossenen Wirkraums (GRUNWALD et al. 2019). In Tabelle 11-1 ist das Vorgehen dargestellt: Pro betrachteter Fläche (I-VIII) sind sechs Kriterien benannt, die in Kombination ein Ranking ergeben. In Bezug zur Größe eines Entstehungsgebiets (EG), das den Kaltluftvolumenstrom erzeugt, wird die Abflussbahn und die Wirkfläche (dWR) kombiniert. So können auch kleinere Kaltluftentstehungsflächen in Nachbarschaften höhere Wertungen erreichen, da sie maßgeblich für den Wirkraum sind.

Hilfestellung gibt unter anderem ein systematischer Ablaufplan für lokale Festsetzungen in Bezug auf einzelne Maßnahmen. Anhand eines Managementplans können diese dann schrittweise abgearbeitet werden (DÜTEMEYER et al. 2013). Weitere Arbeitsabläufe sind auf den Internetseiten des Deutschen Wetterdienstes (Baukasten INKAS) oder für das Vorgehen bei der Beauftragung von Klimaanalysen beim Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) und in der Toolbox *Blue Green Cities* der Hafencity Universität Hamburg (HCU 2022) zu finden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang nicht die Bewertung der Einzelparameter, sondern ihre Wirkung bezüglich der in Abschnitt 2 genannten räumlichen Ziele.

Tabelle 11-1: Kriterien zur Bewertung von Kaltluftentstehung und -abfluss für acht exemplarische Kaltluftbahnen (I-VIII). Je höher das Ranking, desto größer ist die Wirksamkeit der Kaltluftbahn. EG: Entstehungsgebiet, KL: Kaltluftbahn, dWR: kaltluftdurchflossener Wirkraum (nach GRUNWALD et al. 2019).

	Fläche EG in km ²	Fläche KL in km ²	Kaltluftvolumen EG in km ³	Kaltluftvolumen KL in km ³	Fläche dWR in km ²	Kaltluftvolumendifferenz dWR in km ³	Ranking
I	6,4	15,4	0,23	0,51	0,4	0,30	36
II	0,5	6,6	0,02	0,16	1,8	0,45	24
III	0,3	1,7	0,01	0,04	0,5	0,09	9
IV	3,8	7,6	0,14	0,23	1,7	0,48	33
V	5,4	18,0	0,19	0,53	2,4	0,77	44
VI	1,8	5,3	0,06	0,16	0,6	0,13	22
VII	1,5	5,2	0,05	0,15	1,1	0,37	20
VIII	5,9	11,0	0,21	0,37	0,1	0,05	28

Die gesundheitliche Relevanz des Klimas, den gesetzlichen Auftrag im Rahmen der räumlichen Planung zu berücksichtigen, kann mithilfe verschiedener Parameter adressiert werden. Dargestellt werden muss die gesundheitliche Wirkung im Allgemeinen und die Verortung von vulnerablen Gruppen. Um auf die Relevanz der Belastungen für planerische Belange zu kommen sind die Klimaanalysen auch hinsichtlich der Vulnerabilität nutzbar. Hierzu werden die vulnerablen Gruppen und die Anzahl von Betroffenen der Klimakarte überlagert, um so die Bedeutung zu begründen (BZgA 2023).

Bezüglich der Wärmebelastung kann die Richtlinie VDI 3787 Blatt 2 (VDI 2022) herangezogen werden. Ausgehend von der Wärmebilanz des Menschen werden hier Indizes in Belastungskategorien unterteilt. Über Modellierungen und Messungen können den einzelnen Klimatopen Werte zugeordnet und entsprechend der Klassifizierungen dargestellt werden.

Bei allen Maßnahmen zur Klimaanpassung kommt der grünen Infrastruktur eine hohe Bedeutung zu (PAULEIT et al. 2023). Aus den Starkregenkarten kann für das Regenwassermanagement eine räumlich differenzierte Planung abgeleitet werden.

4 Schlussfolgerungen

Im Zuge des Klimawandels sollte das Stadtklima bei allen stadtplanerischen Fragestellungen eine wesentlich höhere Bedeutung in den Abwägungsprozessen erlangen gegenüber beispielsweise dem Wohnbedarf oder Arbeitsplätzen. Deshalb müssen stadtklimatische Grundlagen auf den entsprechenden Planungsebenen bewertet und quantifiziert werden. Die stadtklimatischen Maßnahmen aus den Klimaplanungskarten sind in eine verbindliche Planung einzubeziehen, damit stadtklimatisch begründete Handlungsempfehlungen umgesetzt werden können.

Literatur

- BauGB, 2011/13: Bekanntmachung der Neufassung des Baugesetzbuchs vom 3. November 2017. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017, Teil I Nr. 72, 3634.
- BAUMÜLLER, N., 2018: Stadt im Klimawandel – Klimaanpassung in der Stadtplanung: Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente. Dissertation, Universität Stuttgart, 306 S., Abruf am 24.04.2023, URL: <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/9838>.
- BBauG, 1976: Bekanntmachung der Neufassung des Bundesbaugesetzes vom 18. August 1976. Bundesgesetzblatt Jahrgang 1976, Teil I, 2256-2317.
- BNatSchG, 2009: Viertes Gesetz zur Änderung des Bundesnaturschutzgesetzes vom 20.07.2022. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2022, Teil I Nr. 28, 1362.
- BZgA, 2023: Klima, Mensch, Gesundheit. Informationsportal der Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (BZgA). Abruf am 24.04.2023, URL: <https://www.klima-mensch-gesundheit.de/>.
- DAS, 2008: Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Abruf am 24.04.2023, URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaanpassung/das_gesamt_bf.pdf.
- DÜTEMEYER, D., BARLAG, A.-B., KUTTLER, W., AXT-KITTNER, U., 2013: Stadtklimatisches Flächenmanagement in der kommunalen Umweltplanung. *UVP-report* **27**, 173-179.
- EMEIS, S., 2023: Lokalklimatische Auswirkungen der urbanen Energieversorgung. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 89-96.
- GRUNWALD, L., KOSSMANN, M., WEBER, S., 2019: Mapping urban cold air paths in a central European city using numerical modelling and geospatial analysis. *Urban Climate* **29**, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100503.
- HCU, 2022: BlueGreenStreets Toolbox – Teil A. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere. Hafencity Universität Hamburg (HCU, Hrsg.), doi: 10.34712/142.27.
- HENNINGER, S., WEBER, S., 2020: Stadtklima. utb, Verlag Ferdinand Schöningh, Paderborn, 260 S.
- INKEK, 2022: Klimaanalyse Ingolstadt. Stadt Ingolstadt, Institut für Klima und Energiekonzepte (INKEK).
- KATZSCHNER, L., KUPSKI, S., 2019: Entwicklung geeigneter Stadtstrukturen in verschiedenen Klimazonen. In: Warnsignal Klima – Die Städte. LOZÁN, J.L., BRECKLE, S.-W., GRASSL, H., KUTTLER, W., MATZARAKIS, A. (Hrsg.), Verlag Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO Magazin-Hamburg, Hamburg, 275 -279.
- KUTTLER, W., 2019: Stadtklima: Einführung, Charakteristika, Nachweismöglichkeiten. In: Warnsignal Klima – Die Städte. LOZÁN, J.L., BRECKLE, S.-W., GRASSL, H., KUTTLER, W., MATZARAKIS, A. (Hrsg.), Verlag Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO Magazin-Hamburg, Hamburg, 21-28.
- KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.
- LHS, 2016: Bebauungsplan mit Satzung über örtliche Bauvorschriften Schloß-(ehem. Bismarck-)/Hasenberg-/Breitscheid-/Senefelderstraße, Stuttgart-West (Stgt 258). Bebauungsplan mit Begründung. GR Drs 207/2016, Landeshauptstadt Stuttgart (LHS).
- LHS, 2020: Rahmenplan Talgrund West, Fortschreibung 2020. GR Drs 135/2020, Landeshauptstadt Stuttgart (LHS).
- MATZARAKIS, A., 2023: Hitze in Städten – Quantifizierung, Warnsysteme und Hitzeaktionspläne zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 61-70.
- MEADOWS, D.L., 1972: Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, Deutsche Verlags-Anstalt.

- NG, E., REN, C., 2015: The urban climatic map: a methodology for sustainable urban planning. *Routledge*, London, New York.
- PAULEIT, S., ERLWEIN, S., LINKE, S., RAHMAN, M., ZÖLCH, T., RÖTZNER, T., 2023: Grün-blaue Infrastruktur für die Klimawandelanpassung der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 79-88.
- REN, C., NG, E., KATZSCHNER, L., 2010: Urban climatic map studies: a review. *International Journal of Climatology* **31**, 2213-2233, doi: 10.1002/joc.2237.
- ROSENZWEIG, C., SOLECKI, W., ROMEROLANKAO, P., MEHROTRA, S., DHAKAL, S., ALI IBRAHIM, S. (Hrsg.), 2018: Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network (ARC3.2). *Cambridge University Press*.
- SCHERER, D., 2023: Temperatur und Hitze in der Stadt. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 15-25.
- STEP KLIMA, 2011: Stadtentwicklungsplan (StEP) Klima – Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern. Senatsbeschluss Nr. S-3693/2011 vom 31.05.2011. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin (Hrsg.), *Kulturbuch-Verlag GmbH*, Berlin, 84 S.
- TUM, 2017: Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt „Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt“ am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung. Technische Universität München (Hrsg.), 94 S.
- VDI, 2015: VDI 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie – Klima und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. *Beuth Verlag*, Berlin, 54 S.
- VDI, 2020: VDI 3787 Blatt 8. Umweltmeteorologie – Stadtentwicklung im Klimawandel. *Beuth Verlag*, Berlin, 84 S.
- VDI, 2022: VDI 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. *Beuth Verlag*, Berlin, 80 S.

Kontakt

PROF. DR. JÜRGEN BAUMÜLLER
Universität Stuttgart
Institut für Landschaftsplanung und Ökologie
Keplerstr. 11
70174 Stuttgart
juergen.baumueller@ilpoe.uni-stuttgart.de

PROF. DR. LUTZ KATZSCHNER
Institut für Klima und Energiekonzepte (INKEK)
Schillerstr. 50
34253 Lohfelden
katzschner@inkek.de

W. KUTTLER, B. HOLLÓSI, M. GUBLER

12 Stadtklimatologie im Wandel der Zeit – Einblicke aus Deutschland, Österreich und der Schweiz

Urban climatology in the course of time – insights from Germany, Austria and Switzerland

Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeichnet die Entwicklung der wissenschaftlichen Beschäftigung mit dem Klima und der Luftqualität von Städten in kurzen, exemplarischen Zügen nach. Die Quellenlage lässt eine Analyse der etwa über 2000-jährigen Geschichte der Stadtklimaforschung zu. Es dürften wohl indische und römische Kulturen gewesen sein, die sich dem Problem der Überwärmung und insbesondere dem der Luftverschmutzung in ihren aufstrebenden städtischen Siedlungen zuerst annahmen. Zu Beginn dieses Artikels wird im Rahmen einer internationalen Gesamtschau ein kurzer Abriss dieses Teilgebiets der Umweltmeteorologie gegeben. Anschließend wird die lebhafteste Geschichte der Stadtklimaforschung für Deutschland, Österreich und die Schweiz (Akronym: D-A-CH) an zahlreichen Beispielen und Meilensteinen der Entwicklung referiert.

Summary

This article reviews the development of scientific research on climate and air quality in cities in short, exemplary sections. The literature allows for an analysis of the 2000-year history of urban climate research. Probably the Indian and Roman cultures were the first who addressed the problem of overheating and especially that of air pollution in their emerging urban settlements. At the beginning of this article, a brief outline of this branch of environmental meteorology is given as part of an overall international review. Subsequently, the lively history of urban climate research for Germany, Austria, and Switzerland (acronym: D-A-CH) will be reported using numerous examples and milestones of its development.

1 Einleitung

Städte weisen in Abhängigkeit ihres Grund- und Aufrisses, der Zuordnung und Mischung natürlicher und bebauter Flächen, ihres Versiegelungsgrades, der Emission an Abwärme und Luftbeimengungen, des vorherrschenden Witterungstyps, der topographischen Lage sowie der sozioökonomischen Verhältnisse charakteristische thermische, hygri-sche und strömungsdynamische Unterschiede im Vergleich zu ihrem ländlich geprägten Umland auf (KUTTLER und GROSS 2023, KUTTLER und WEBER 2023). Die wissenschaftliche Beschäftigung mit dem Sonderklima der Städte, dem Stadtklima, lässt sich etwa 2000 Jahre zurückverfolgen. Der nachfolgende Beitrag wird, ausgehend von einem kurzen internationalen Überblick zur Geschichte der Stadtklimatologie, wesentliche Teile ihrer Entwicklung am Beispiel der Länder Deutschland, Österreich und der Schweiz (D-A-CH) nachzeichnen.

2 Internationale Gesamtschau

2.1 Antike

Erste schriftliche Berichte zum Klima und zur Luftqualität von Städten widmeten sich vornehmlich dem Problem der bodennahen Luftverschmutzung durch Rauch, aber auch der im Vergleich zum kühleren Umland auftretenden Überwärmung. So finden sich entsprechende Arbeiten zu diesem Thema bereits in frühen indischen und römischen Quellen (YOSHINO 1990/91). Während einerseits der Schutz vor (sommerlicher) Sonnenstrahlung in Städten entsprechender geographischen Breiten als wichtig angesehen wurde, gab es andererseits zahlreiche Beschreibungen über die „Verräucherung“ der bodennahen Luftschicht durch Herdfeuer sowie durch den Rauch von Schmelzöfen und Töpfereien mit ihren niedrig gelegenen Quellhöhen. Mit dem Begriff „gravius caelum“ (lateinisch, „schwerer Him-

mel“), der auf Seneca zurückgehen soll, wurde in Rom die fast permanent vorhandene Dunstglocke über der Stadt bezeichnet, der man sich nur durch Flucht in die umliegenden Berge entziehen konnte, wo (aufgrund der Temperaturinversion) sauberere Luft vorherrschte (siehe NEUMANN 1979).

Als bahnbrechend für die damalige Zeit dürfte das Werk des römischen Architekten und Bauingenieurs Marcus Vitruvius (75–26 vor Christus) angesehen werden, der in „De Architectura libri decem“ („Zehn Bücher über Architektur“) das seinerzeitige Wissen über die Anlage und die Struktur von Städten, ergänzt durch Hinweise auf das Lokalklima und die Luftqualität, nicht nur zusammengetragen, sondern auch erste Empfehlungen zur antiken Stadtplanung gegeben hat (FENSTERBUSCH 1991).

2.2 Mittelalter

Starke Bevölkerungszunahmen der frühen urbanen Siedlungsgebiete, die überwiegend auf dem mittelalterlichen Rechtsgrundsatz „Stadtluft macht frei nach Jahr und Tag“ beruhten, verlangten nach dem Bau neuer Wohnhäuser. Die dadurch verursachten Umweltprobleme waren gravierend. Exemplarisch sei hier der englische Architekt, Gartenbauer und Tagebuchschreiber John Evelyn (1620–1706) genannt, der sich in einem Brief an König Charles II. (1661) der katastrophalen Probleme der Londoner Luftverschmutzung annahm und auf die damit verbundenen starken Gesundheitsbeeinträchtigungen der Bevölkerung hinwies. Sein Brief (Abb. 12-1) 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 pestilenzartige Rauch nicht in hohen Schornsteinen abgeführt wurde, sondern meist durch Löcher in den Dächern („Rauchküchen“) der flachen Häuser abzog. Die schlechte Luftqualität wurde ferner durch die meist hohe Luftfeuchtigkeit verstärkt, bedingt durch die geographische Lage Londons im Themsetal und an der nahen Nordsee. Hierdurch bildete sich insbesondere im Herbst und Winter der berüchtigte „City Fog“. Londons Bevölkerung litt auch noch 300 Jahre später unter dieser Luftverschmutzung. Die Stadt war schließlich namensgebend für den berüchtigten schwefelsauren „London Smog“ (KUTTLER 1979a), den seinerzeit sogar der Schriftsteller Charles Dickens (1812–1870) in seinem Buch „Bleak House“ („Trostloses Haus“) literarisch verarbeitete.

2.3 Neuzeit

In den Fokus der stärker werdenden Beschäftigung mit dem Klima der Städte trat neben die Analyse der Luftverschmutzung auch die sommerliche Hitzebelastung, der die Stadtbevölkerung besonders ausgesetzt war. Von der Hitze waren beispielsweise hauptsächlich Großstädte der niederen Breiten betroffen, in denen Ärzte (z. B. in New York und Philadelphia) 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 stärker aufheizten als naturbelassene, ließen auch nachts kaum Abkühlung zu (JANKOVIC 2013, JANKOVIC und HEBBERT 2012).

Die Neuzeit brachte nicht nur weitere Erkenntnisse in Bezug auf die städtische Hitzebelastung mit sich, sondern führte auch zu großen Entwicklungsschritten im Bereich der Messtechnik. Mithilfe verschiedener Instrumente begannen die Vermessung und Klassifizierung zahlreicher atmosphärischer Parameter, womit sich die beobachtende, rein deskriptive Wissenschaft immer stärker zu einer messenden entwickelte.

Eine erste systematische, zusammenfassende und bis dahin nicht gekannte, außerordentlich detaillierte Untersuchung über die meteorologischen und klimatischen Facetten der städtischen Atmosphäre legte schließlich der englische Apotheker Luke Howard (1772–1864) für die Stadt London vor, die 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 publizierte 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 aus heutiger Sicht ein Bestseller (HOWARD 1833).

Howard maß an den von ihm persönlich betreuten Stationen innerhalb und außerhalb Londons alle meteorologi-

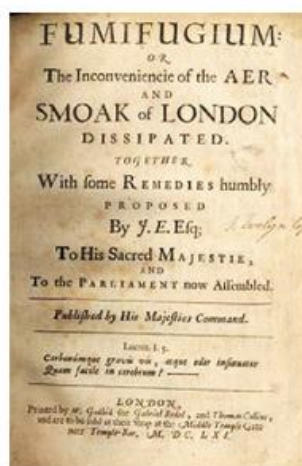


Abbildung 12-1: Titelseite der von John Evelyn verfassten Schrift „Fumifugium“ (Quelle: <https://library.ucsd.edu/speccoll/weather/b4162440.html>).

schen Elemente, sogar den Tau und die Verdunstung. Die von ihm verwendeten Messgeräte wurden in seinem Buch genauestens beschrieben.

3 Deutschland, Österreich und die Schweiz im Fokus

3.1 Beginn einer systematischen Erfassung des Stadtklimas

Während Howard aufgrund seiner zahlreichen und mehrjährig betriebenen Stadt- und Umlandstationen in der Lage war, eine nach heutigen Maßstäben „gesamstädtische Klimaanalyse“ für London vorzulegen, wurden auch in Kontinentaleuropa wichtige Einzelfallbeobachtungen durchgeführt. So standen in Wien Messungen zum Stadt- und Bioklima sowie Analysen über die Einflüsse von Witterung und Klima auf die menschliche Gesundheit im Fokus der Untersuchungen durch Carl von Littrow (1860), Joseph Frank (1843) sowie den Benediktinermönch Emerich Gabely (1864).

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts begann man darüber hinaus in einzelnen Städten Mitteleuropas, so auch in Deutschland, Österreich und der Schweiz, ein „ozonometrisches Messnetz“ aufzubauen. Die mit der Schönbein-Methode (siehe LAUSCHER 1984) ermittelten Daten wurden auf die heutzutage übliche Einheit ppb bzw. $\mu\text{g m}^{-3}$ umgerechnet und sind in Tabelle 12-1 dargestellt. Die damaligen Konzentrationen bewegten sich in den beiden

deutschen Städten zwischen 18 ppb und 22 ppb, in den drei österreichischen Städten zwischen 16 ppb und 32 ppb sowie an der Schweizer Station um 19 ppb, welche ungefähr denjenigen der heutigen Zeit entsprechen (20 ppb bis 25 ppb repräsentieren langjährige Mittelwerte an deutschen Stadtstationen von 1995 bis 2021; UBA 2022). In Bern (CH) verknüpfte überdies Rudolf Wolf zwischen 1853 und 1854 die dort gemessenen Ozondaten mit entsprechenden Mortalitätsstatistiken der Bevölkerung und stellte unter anderem fest, dass „[...] am Tage einer starken Ozonreaction, und auch an allen folgenden acht Tagen die Sterblichkeit grösser ist [...]“ (WOLF 1855, S. 15) als an Tagen mit geringerer Ozonbelastung.

Impulse zu einer zunehmend systematischen Erforschung des Stadtklimas in Kontinentaleuropa gaben zu Beginn des 20. Jahrhunderts im Wesentlichen deutsche und österreichische Wissenschaftler um Julius von Hann (A), Gustav Hellmann (D), August Schmauss (D), Wilhelm Schmidt (A) und Albert Pepler (D).

Unter ihnen hatte sich Julius von Hann, der übrigens später mit Reinhard Süring das umfangreiche „Lehrbuch der Meteorologie“ (HANN und SÜRING 1915) in mehreren Bänden verfasste und herausgab, schon früh mit den „Temperaturunterschieden zwischen Stadt und Land“ beschäftigt und berücksichtigte bei seiner Auswertung auch unterschiedliche Stationshöhen. Die Messungen der (Luft-) Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland wertete er nicht nur für Wien, sondern auch für Budapest,

Tabelle 12-1: Mittelwerte der Ozonmischungsverhältnisse (in ppb) auf Basis der Schönbein-Methode für verschiedene Städte der Jahre 1853–1900. Kalibriert und umgerechnet nach der Bojkov-Methode, 1986 (nach LISAC et al. 2010).

Ozonometrische Stationen	Geogr. Breite ϕ (N)	Geogr. Länge λ (E)	Höhe H (in m ü. NN)	Zeitraum	Ozon (in ppb)
1 – Emden	54° 20'	10° 12'	12	1857–1873	18
2 – Lodz	51° 44'	19° 24'	188	1855–1856	21
3 – Leipzig	51° 19'	12° 25'	148	1868–1870	22
4 – Prag	50° 06'	14° 15'	369	1854–1857	11
5 – Krakau	50° 05'	19° 48'	237	1853–1873	23
6 – Paris	49° 01'	02° 32'	109	1865–1875	17
7 – Straßburg	48° 33'	07° 38'	154	1854–1864	23
8 – Wien	48° 15'	16° 22'	209	1854–1873	16
9 – Salzburg	47° 48'	13° 00'	450	1855–1857	32
10 – Bern	46° 55'	07° 30'	511	1853–1855	19
11 – Szeged	46° 15'	20° 06'	84	1855–1856	24
12 – Klagenfurt	46° 39'	14° 20'	447	1854–1873	21
13 – Zagreb	45° 49'	15° 59'	163	1893–1900	29 (Tag)
					27 (Nacht)

München, Paris und sogar Kalkutta aus. Dabei wies er auf ein prägendes Element stadtklimatischer Messungen hin, welches vielfach nicht beachtet wurde und heutzutage leider manchmal auch noch übersehen wird: Die „Temperaturüberschüsse“ der Städte sind in erster Linie nicht nur von deren Größe abhängig, sondern im Wesentlichen von „der nächsten Umgebung der Station“ (HANN 1885, S. 459). Das ist unter anderem der Grund dafür, dass einfache Korrelationen zwischen einer Stadtgröße (dargestellt zum Beispiel durch die Einwohnerzahl) und der entsprechenden städtischen Wärmeinsel (*Urban Heat Island*, UHI) nur geringe Varianzerklärungen erreichen (z. B. KUTTLER 2012).

Eine erste kurze Zusammenfassung des damaligen Standes der Stadtklimaforschung erfolgte durch Wilhelm Schmidt im Jahre 1917 („Zum Einfluss großer Städte auf das Klima“). Er analysierte dazu mehrere auf das Stadtklima wirkende Faktoren, wie die künstlichen Wärmezufuhren aus technischen Prozessen an Beispielen aus London, Berlin und Wien.

Eine der grundlegenden Erkenntnisse 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 deshalb die in Städten gewonnenen Daten, welche einer künstlichen Umgebung entstammten und demzufolge einem eigenen „anthropogenen“ Klimatyp zugeordnet werden mussten, nicht einfließen. So hat zum Beispiel Heinrich Wild städtische Messungen nicht in sein

Werk „Temperaturverhältnisse des russischen Reiches“ (WILD 1881) aufgenommen, da er „einen störenden Einfluss der Stadt“ vermutete, welche in den Messungen unter anderem durch die verspäteten Minima im Sommer ersichtlich waren (VALENTIN 1901).

Zahlreiche zum Teil auf langjährigen Messreihen basierende Untersuchungen zum Stadtklima wurden beispielsweise in Deutschland in Berlin (BEHRE 1908) sowie Stuttgart (KNAUSS 1901) durchgeführt. In der baden-württembergischen Landeshauptstadt, die sich durch eine komplexe Topographie auszeichnet, erkannte man, dass gerade eine Siedlung in gegliedertem Gelände einer besonderen Zuwendung durch die Stadtklimaforschung bedurfte und richtete bereits 1938 eine bis heute fortbestehende Stadtklimatologieabteilung (langjähriger Leiter war Jürgen Baumüller) ein – eine für die damalige Zeit in Deutschland absolute Seltenheit.

Ferner wurde der indirekten Erfassung stadtklimatischer, insbesondere thermischer Parameter seit Beginn des 19. Jahrhunderts zunehmende Aufmerksamkeit gewidmet. Indem man die Entwicklungsstadien von Pflanzen – auch im Vergleich zwischen Stadt und Umland – im Jahresgang miteinander verglich, machte man sich diese Daten für eine Abschätzung der städtischen Überwärmung ebenfalls zunutze. Eine lange phänologische Reihe liegt zum Beispiel seit 1808 für die Stadt Genf (CH) für die Eintrittsdaten des Blattaustriebs einer Rosskastanie vor. Im Vergleich zum Jahr 2000 haben sich die Blattaustriebe von etwa 110 Tagen nach Jahresbeginn (1808) auf unter 40 Tage reduziert. Natürlich ist das nicht nur auf die stadtklimatischen Veränderungen, sondern auch auf den globalklimatischen Einfluss zurückzuführen (DEFILA und CLOT 2001).

Phänologische Beobachtungen haben ferner in Österreich eine lange Tradition, die unter anderem auf Karl Frisch (1812–1879) zurückgeht, der den ersten Anstoß für derartige Erfassungen in die im Jahr 1851 gegründete Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG, seit 2023 Geosphere Austria) einbrachte. In Deutschland waren es vor allem Fritz Schnelle (1900–1990) sowie Franz Seyfert (1908–1986), die sich um die Einrichtung eines phänologischen Messnetzes verdient machten, das später immer stärker auch für stadtklimatische Analysen genutzt wurde.

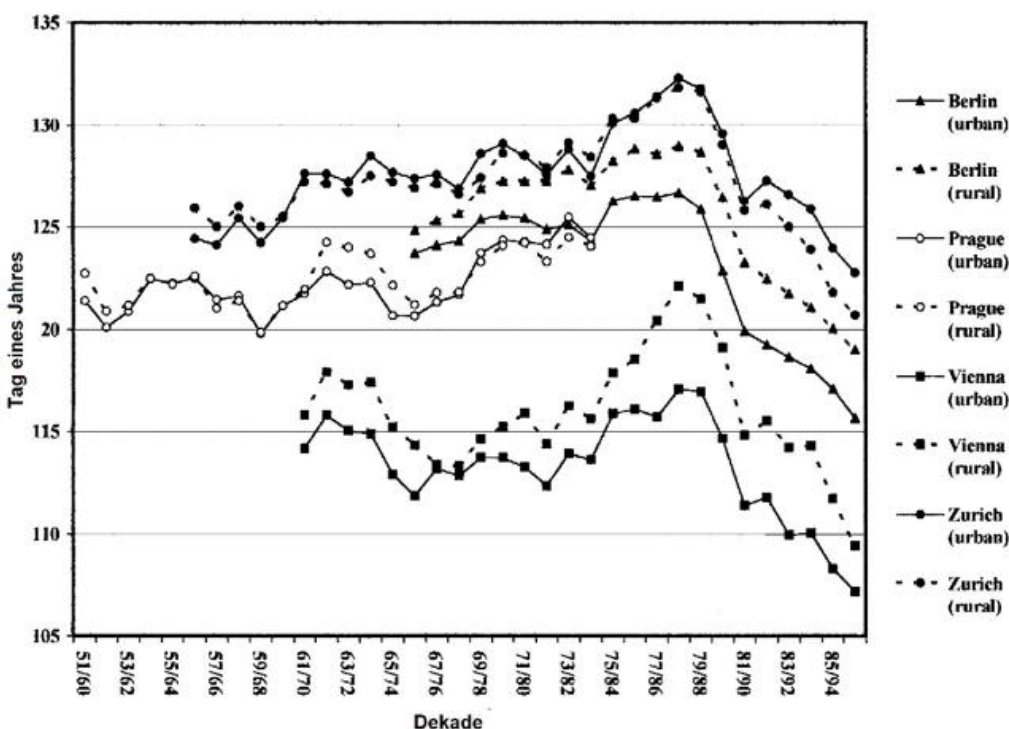


Abbildung 12-2: Beginn der Blühphase von Apfelbäumen (*Malus domestica*) in urbanen und ruralen Gebieten von Berlin, Prag, Wien und Zürich (10-jährige laufende Mittelwerte, von 1951/1960 bis 1986/1995 (aus ROETZNER et al. 2000).

Abbildung 12-2 belegt (für die allerdings etwas spätere Zeitspanne 1951–1995) nicht nur die phänologischen Unterschiede zwischen Stadt und Umland, sondern auch die besonders starke Verfrühung seit den 1970er Jahren.

Auch in der Kunst wurde das Stadtklima zu jener Zeit verschiedentlich aufgegriffen. So von Adalbert Stifter in seinem Werk „Aus dem Alten Wien“, in dem er die zwischen Land und Stadt herrschenden Temperaturunterschiede auf seine Weise beschrieb:

„Nun ist es aber klar, dass die ganze Stadt nicht Anderes ist als eine große poröse Scheibe unter dem Netze der darauf niederfallenden Sonnenstrahlen; sie muss sich daher heftig erwärmen wie ein in der Sonne liegender Sandkuchen. Allein dies ist nicht alles; auch das lehrte die obige Kommission, daß von glatten weißen Wänden die strahlende Wärme mehr reflektiert werde als von dunklen, rauhen – und wo sind denn mehr lichte, glatte Wände, die die Wärme eine der andern zuwerfen, als gerade in der Stadt? (...) Dies wissen viele Hofräte und Grafen sehr gut, die imstande sind, eine nette Sommerwohnung auf dem Lande zu haben; denn während sie in der Stadt bei offenem Fenstern schlafen und fast vor Hitze umkommen, müssen sie die Fenster der Landwohnung abends schließen, sonst verkühlen sie sich. Aus dem, glaube ich, geht zur Genüge und objektiv hervor, dass in unserer Stadt ein ungleich heißeres Klima ist als auf dem umliegenden Lande, und dass auf ihr ein boshafter, erhitzter Luftberg stehe, der wieder die traurigsten Folgen nach sich zieht.“

(STIFTER 1909, S. 338).

3.2 Von der Grundlagenforschung zur praxisorientierten Anwendung

Die vorgenannten Veröffentlichungen bildeten zu Beginn des 20. Jahrhunderts auch die Grundlage dafür, die gewonnenen Erkenntnisse grundsätzlich stärker für den praxisorientierten, das heißt, stadtplanerischen Bereich einzusetzen. Maßgeblich initiiert und befördert hat diesen Zweig der angewandten Stadtklimatologie unter anderem der Meteorologe und damalige Abteilungsvorsteher des Preußischen Meteorologischen Institutes in Berlin Carl 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 klimadäquat baut, sondern setzte sich unter stadtklimatischen Aspekten insbesondere mit den mitteleuropäischen Stadtstrukturen auseinander.

Einen Meilenstein in der Stadtklimaanalytik stellten die mobilen Messwerterfassungen mithilfe von Kraftfahrzeugen dar, die offensichtlich zuerst von Wilhelm Schmidt in Wien 1927 (SCHMIDT 1930) und dann 1929 von Albert Peppeler in Karlsruhe (PEPPLER 1929) mit

dem Ziel erfolgten, die horizontale Verteilung der Lufttemperatur innerhalb und außerhalb der beiden Städte mit Quecksilberthermometern zu ermitteln. Darauf basierend wurden „flächendeckende“ Isothermenkarten für die beiden Stadtgebiete angefertigt. Neben der flächenmäßigen Untersuchung stadtklimatischer Parameter führte man in zunehmendem Maße auch vertikale Analysen der urbanen Grenzschicht durch. So erfolgten erste Messungen hierzu an hohen Türmen, zum Beispiel in Leipzig.

Temperaturmessfahrten in Wien, die Steinhauser 1932 veranlasst hatte, wurden mit denjenigen, die im Jahre 2015 auf der gleichen Messstrecke von Anton Neureiter ermittelt wurden, verglichen, und zwar unter Berücksichtigung der veränderten städtebaulichen Charakteristika. Die in den früheren Messfahrten erkennbaren Temperaturunterschiede zwischen Stadtzentrum und der (rurale Charakteristika aufweisenden) Wagramerstraße sind mittlerweile durch städtebauliche Maßnahmen ausgeglichen (Abb. 12-3).

Die über die Jahre der damaligen Zeit stark angestiegene Zahl an Veröffentlichungen zur Stadtklimatologie bereite-te den Boden für einen ersten zusammenfassenden wissenschaftlichen Überblick über den Stand dieser Forschungsdisziplin. Es war der Benediktinermönch Pater Albert Kratzer aus dem Kloster Ettal (D), der in seiner Dissertation (1937) zum Thema „Das Stadtklima“ über 200 Einzelveröffentlichungen verarbeitete. Die weitere stürmische Entwicklung der Stadtklimatologie zeigt sich auch daran, dass Kratzer in der zweiten Auflage seines Buches (1956) – trotz der dazwischenliegenden Kriegsjahre – bereits mehr als 560 Literaturzitate verarbeiten konnte. Kratzer widmete sich in der Neuauflage 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 die Staubbelastung zwischen Werktagen und Wochenenden. Ferner äußerte er die Vermutung, dass die immense Freisetzung an Staubteilchen dazu führen könnte, weltweit die Albedo von Gletscheroberflächen derart zu verringern, sodass diese verstärkt abschmelzen. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch der frühe, prognostisch zu wertende Hinweis von Plaß (zitiert in KRATZER 1956) der besagt, dass aufgrund des außerordentlich starken CO₂-Ausstoßes durch Kohleverbrennung in Städten 6 Milliarden Tonnen CO₂ 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 (damals im Wesentlichen durch Kohleverbrennung) an den natürlichen Strahlungsflüssen hat. Die von ihm zusammengetragenen Ergebnisse zeigten zum Beispiel für Wintertage, dass die künstliche Wärmeerzeugung in den damaligen Städten teilweise gleich hohe Werte wie die natürliche Wärmebilanz erreicht.

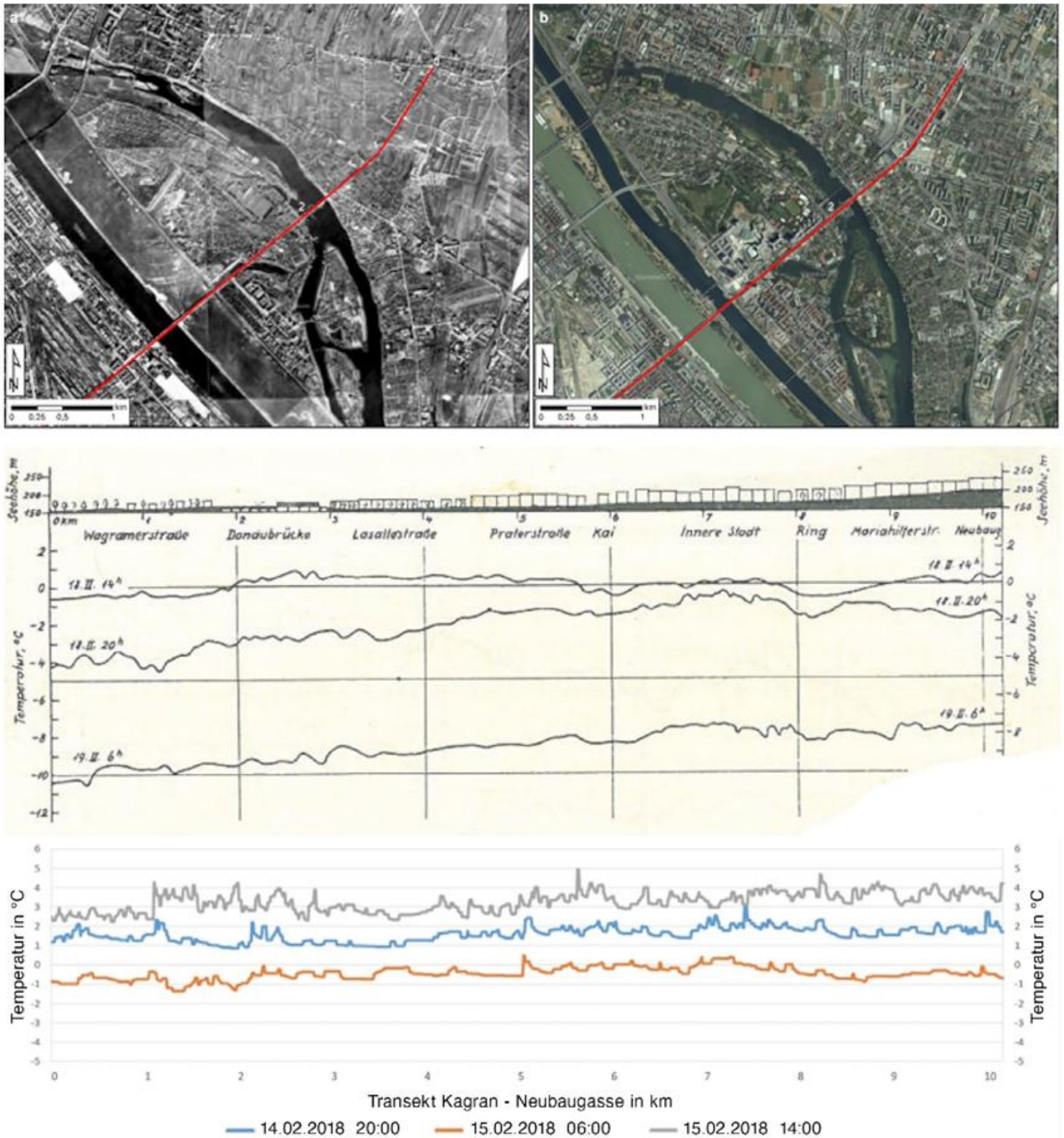


Abbildung 12-3: Vergleich der Februar-Messfahrten aus den Jahren 1932 und 2018 zwischen Wien-Kagran (Wagramerstraße) und Neubaugasse (Stadtzentrum). *Oben:* Luftbild von 1938 (*links*) und 2018 (*rechts*) mit Streckenverlauf der Profilmessfahrten. *Unten:* Gegenüberstellung der Messdaten (Temperatur in °C) von Kilometer 0 bis 10 des West-Ost-Transektes in Wien (aus NEUREITER 2018).

3.3 Stadtklima und Lufthygiene

Ebenfalls wurde die Untersuchung des auf den Menschen bezogenen Bioklimas und der Luftqualität einer Stadt, heutzutage unter dem Begriff Human-Biometeorologie zusammenfasst, seit der Mitte des 20. Jahrhunderts systematisch vorangetrieben. Maßgeblich daran beteiligt war die Wiener Gruppe um Ferdinand Steinhauser, Othmar Eckel und Franz Sauberer. Durch Steinhauser wurde unter anderem 1956 die Forschungsabteilung für Luftchemie an der

ZAMG gegründet. Hier wurden neben meteorologischen Daten auch Messungen des pH-Wertes des Niederschlags, der Schneedecke sowie des CO_2 - und O_3 -Gehaltes der Luft vorgenommen. Im Laufe der Zeit konnte auf Daten von über 20 Messstellen im Stadtgebiet von Wien zurückgegriffen werden. Wesentliche Ergebnisse wurden in dem dreibändigen Werk zum „Klima und Bioklima von Wien“ (STEINHAUSER et al. 1955, 1957, 1959) veröffentlicht, mit dem Ziel, „eine für die Praxis bestimmte Sammlung von Ergebnissen meist langjähriger, aber auch kürzerer Beob-



Abbildung 12-4: Aerosolmessungen auf dem Donauturm in Wien im Jahre 1964 (aus HAMMERL 2005).

achtungreihen“ (STEINHAUSER et al. 1955, S. 3) vorzulegen. Teil I enthält umfangreiche Daten zu den wichtigsten meteorologischen Elementen, Teil II die Auswertungen zu den säkularen Änderungen des Klimas sowie „Sonderbearbeitungen für Zwecke der Bautechnik und der Großstadt-hygiene (STEINHAUSER et al. 1957, S. 47) wie Schlagregen, Nebel und die Verteilung des Stadtdunstes und Teil III widmet sich unter anderem der Analyse trocken und nass deponierter Luftverunreinigungen (SO₂, SO₄²⁻, CO₂, CO, O₃) sowie der Radioaktivität, des Keimgehalts der Luft und der Verbreitung von Flechten als Bioindikatoren zur Angabe der Luftqualität. Weiterhin wurde im Jahre 1962 in Österreich eine Kommission für Reinhaltung der Luft eingerichtet, die sich zum Beispiel unter lufthygienischen Gesichtspunkten mit der Stadtplanung und der Einrichtung von Industrieanlagen, aber auch mit der Standortwahl heilklimatischer Kurorte zu beschäftigen hatte. Ebenso messtechnisch wichtig wie publikumswirksam wurde 1964 eine Messstation auf der Aussichtsterrasse in 150 m Höhe des 250 m hohen Donauturms in Wien zur Messung gas- und partikelförmiger Luftinhaltsstoffe eingerichtet (Abb. 12-4). Aus den Daten wurden später Luftqualitätskriterien abgeleitet, welche die Basis für Grenz- und Richtwerte verschiedener Luftverunreinigungen bildeten (HAMMERL 2005).

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts erschienen Beiträge zur stadtklimatischen Grundlagenforschung aus der Schweiz noch selten. Das dürfte daran gelegen haben, dass es dort bis dato keine Großstädte gab. Nichtsdestotrotz kann eine Tendenz zur Diffusion stadtklimatologischer Erkenntnisse aus dem Ausland in die raumplanerische, städtebauliche und architektonische Praxis Schweizer Städte festgestellt werden. Davon zeugen insbesondere die Publikationen des Basler Architekten Fritz Lodewig, die sich beispielsweise der klimatischen und lufthygienischen Bedeutung von städtischen Grünanlagen für die Erholung und Gesundheit der Stadtbevölkerung widmeten. In diesen Schriften werden aber auch stadtklimatische Aspekte „... (die durch) Verbrennungsanlagen (Heizung, Verbrennungsmotoren usw.), durch das grosse Wärmespeichervermögen

der vielen Bauwerke, Plätze, Straßen und durch die größere Anzahl von Unterschieden zwischen Licht- und Schattenräumen (hervorgerufen werden, behandelt)“ (LODEWIG 1939, S. 105). Ebenso publizierte er in der „Schweizerischen Technischen Zeitschrift“ eine Zusammenfassung der Zweitaufgabe von Kratzers „Das Stadtklima“ (1956) und schloss diese mit einem eindringlichen Appell an Forschung und Politik in der Schweiz, entsprechende Grundlagen zu erarbeiten und in die Stadtplanung einfließen zu lassen (LODEWIG 1957).

Dem wurde in Deutschland durch die Erstellung von Stadtklimaanalysen Rechnung getragen, zum Beispiel für verschiedene Städte an Rhein und Ruhr durch den Regionalverband Ruhr, Essen (RVR; früher Siedlungsverband Ruhrkohlenbezirk, SVR, Essen). Auch in Österreich flossen stadtplanerische Aspekte, so 1976 für Salzburg, 1985 für Klagenfurt und 1982 für Graz in Stadtklimaanalysen ein. Ähnlich wie Jahrzehnte zuvor in Stuttgart, wurde beispielsweise in der Stadtverwaltung Linz (A) während der 1960er Jahre ebenfalls eine eigene Stadtklimaabteilung eingerichtet.

Etwa von den frühen 1980er Jahren an etablierte sich die Stadtklimaforschung in verstärktem Maße auch an verschiedenen Universitäten der D-A-CH-Länder durch Gründung oder Umwidmung entsprechender Institute (so in Freiburg/Breisgau, Kassel, Essen, Berlin, Hannover, Karlsruhe, Bern, Basel und Wien). Das geschah insbesondere vor dem Hintergrund eines gesteigerten Umweltbewusstseins von Bevölkerung und Politik.

Sozusagen als Fortführung der auf Initiative von Steinhäuser begonnenen Arbeiten zur Stadtklimatologie, wurde in Wien das vorliegende meteorologische und lufthygienische Datenmaterial für eine „anwendungsorientierte Klimatographie“ ausgewertet. Dieser erste „Klima-atlas“ machte nicht nur Aussagen zum Stadtklima von Wien (Abb. 12-5), sondern auch zu verschiedenen human-bio-meteorologischen Aspekten und bestach durch seine verständliche Darstellung, was ihn äußerst beliebt bei den Nutzern, nämlich Planern, Technikern, Baustoff- und Energieexperten, machte (AUER et al. 1989).



Abbildung 12-5: Deckblatt des Buches „Klima von Wien – Eine anwendungsorientierte Klimatographie“ von Ingeborg Auer, Reinhard Böhm und Hans Mohnl (aus AUER et al. 1989).

Auf internationaler Ebene wurde der Stand der Stadtklimaforschung in den 1980er Jahren in der von Helmut Landsberg publizierten Monographie „The Urban Climate“ (LANDSBERG 1981) – der Arbeit Kratzers von 1956 folgend – zusammengefasst: Hierin wurde neben der Behandlung der wichtigsten meteorologischen Elemente und ihre Beeinflussung durch große Städte auch auf den Aspekt der Stadtplanung aus meteorologischer Sicht eingegangen. Letztgenannter Faktor spielte zum Beispiel in Deutschland eine zunehmende Rolle wie entsprechende deutsche 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. Jahrhunderts verstärkt auftretenden Smogepisoden, die überwiegend im Winterhalbjahr während austauschärmer Wetterlagen mit hohen Ruß- und SO_2 -Konzentrationen einhergingen, wurde dem Aspekt der „Immissionsklimatologie“ nicht nur in Österreich, sondern auch in Deutschland, besonders beispielsweise in der Industrieregion an Rhein und Ruhr, größere Beachtung geschenkt (KUTTLER 1979b).

Die Smogwetterlage in der ersten Dezemberwoche 1962, die sich besonders stark im Ruhrgebiet mit hohen Ruß- und SO_2 -Konzentrationen auswirkte (man beachte das Maximum in Abb. 12-6, Abb. 12-7), war mit ein ausschlaggebender Grund, dass nicht nur in Nordrhein-Westfalen, sondern in ganz Deutschland der Immissionsschutz durch Grün-



Abbildung 12-7: Smogwarntafeln weisen auf Fahrverbote während der Smoglage im Dezember 1962 im Ruhrgebiet hin (Foto: Wilhelm Kuttler).

zung entsprechend ausgerichteter Landes-, Bundes- und auch Universitätsinstitute, auf eine politisch wirksame Ebene gestellt wurde (WURZLER et al. 2023).

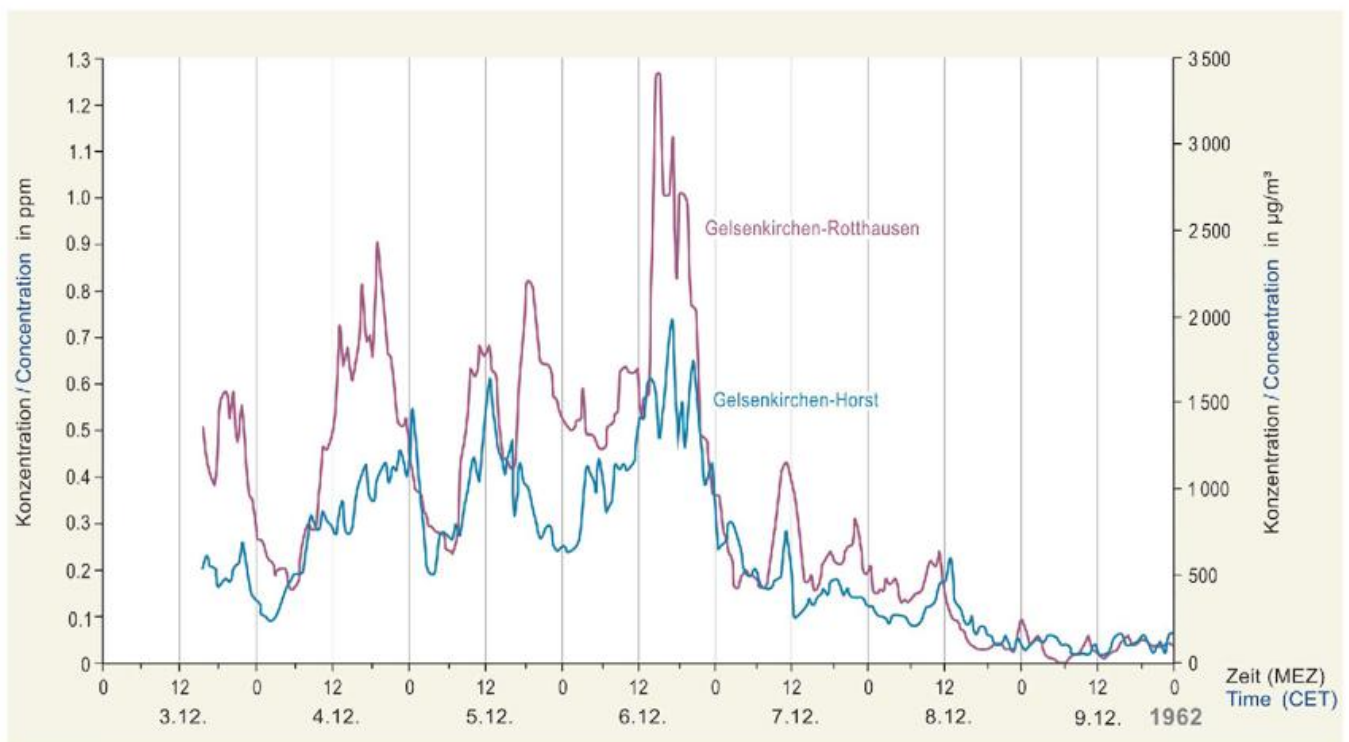


Abbildung 12-6: Stundenmittelwerte der SO_2 -Konzentrationen der Luft an zwei Messstationen im Ruhrgebiet während der Smogepisode vom 3. bis 9. Dezember 1962. Man beachte das Maxima, das in Gelsenkirchen-Rotthausen am 6.12., nachmittags, bei fast $3500 \mu\text{g m}^{-3}$ lag (aus KUTTLER et al. 2015).

Man besann sich in dieser Zeit auch dem schon seit langem bekannten indirekten Nachweis der Luftqualität durch pflanzliche Reaktionen. So wurden zum Beispiel Flechten, später aber auch höhere Pflanzen, insbesondere im Ruhrgebiet, dazu verwendet, eine räumliche Abgrenzung belasteter Luft zu ermöglichen (DOMRÖS 1966, GUDERIAN 1986).

Vor dem Hintergrund praxisorientierter Problemstellungen im Spannungsfeld zwischen Luftreinhalte und Raumplanung, wurde auch die Schweiz ab den 1970er Jahren Schauplatz groß angelegter Stadtklimastudien. Eine der ersten und umfangreichsten stadtklimatologischen Untersuchungen dieser Zeit stellte das Forschungsprogramm KLIMUS (Klima und Lufthygiene im Raum Bern) dar. Basierend auf einem ausgedehnten Messnetz wurden von 1972 bis 1980 grundlegende Erkenntnisse zur Durchlüftungsdynamik des Aaregrabens, zur lufthygienischen Belastung durch Schwefeldioxid und Staub des Stadtgebiets, zu regionalen Windsystemen sowie zur städtischen Wärmeinsel Berns gewonnen, in Form von Klimaeignungskarten visualisiert und ausgehend von aktuellen Brennpunkten der Stadtentwicklung potentielle Ziel- und Nutzungskonflikte eruiert (MATHYS et al. 1980).

Auch wurden mehrere große Stadtklimastudien mit Fokus auf lufthygienisch-meteorologische Fragestellungen durchgeführt (WANNER 1983): In der Stadt Biel stand, neben der Untersuchung von lufthygienischen Wirkungsketten am topographisch komplexen Jura-Südfuß mittels Messdaten sowie numerischer Modelle, insbesondere die Erforschung von Auswirkungen der Luftverschmutzung (z. B. auch auf Flechten sowie Atemwegserkrankungen bei Kindern) im Zentrum (WANNER 1991 für eine Zusammenfassung). Parallel dazu erfolgten am Rheinknie Grundlagenarbeiten zu Klima und Lufthygiene im Raum Basel und wurden im Rahmen des Regio-Klima-Projektes weiter vertieft (REKLIP; PARLOW 1992, 1994, 1996; FIEDLER 1992). In der größten Schweizer Stadt, Zürich, steuerte das Geographische Institut der ETH zentrale Grundlagenarbeiten zum Verständnis der Meteorologie der städtischen Grenzschicht bei, die mittels Messungen in verschiedenen Höhen zwischen Boden- und Dachniveau sowie Modellierungen gewonnen wurden (SCHMID 1984, SCHUHMACHER 1984, ROTACH 1994). Trotz eines starken Fokus auf lufthygienische und raumplanerische Fragestellungen wurde dabei auch die Intensität der städtischen Wärmeinseln der größeren Schweizer Städte analysiert und von WANNER (1983) sowie WANNER und HERTIG (1984) zusammengefasst.

Aus methodischer Sicht bot die aufkommende Verfügbarkeit von Satellitendaten Anlass für erste fernerkundungsbasierte Stadtklimaanalysen, wie Untersuchungen zur räumlichen Ausprägung der städtischen Wärmeinseln in Deutschland, Österreich und der Schweiz (Bern, *Heat Capacity Mapping Mission* der NASA; WINIGER et al. 1982). Im Rahmen der internationalen Pilotstudie ERSCLIP (*ERS-Climate Project*) wurden zum Beispiel Satelliten-



Abbildung 12-8: Messturm auf dem Dach des ehemaligen Meteorologischen Instituts der Universität Basel, ausgestattet mit einer Vielzahl meteorologischer Messgeräte auf unterschiedlichen Höhen zur Untersuchung der vertikalen Turbulenzprozesse in der Stadthindernisschicht. Die Daten fanden unter anderem im BUBBLE-Projekt Anwendung (ROTACH et al. 2005; Foto: https://www.mcr.unibas.ch/dolueg2/projects/campaigns/BUBBLE/textpages/ov_frameset.en.htm).

daten für den Raum Basel als Grundlage für die Ableitung hochaufgelöster, stadtklimarelevanter Datensätze herangezogen (SCHERER et al. 1996, PARLOW et al. 1996), welche als Inputdaten für Stadtklima- und Bioklimamodelle sowie als Ausgangspunkt für Planungshinweiskarten verwendet wurden (PARLOW 1999). Daran anknüpfend, sowie als Ergänzung zu den Energiebilanzmessungen des REKLIP, wurden im Rahmen des Projektes BASTA (Basler Stadtklima Projekt) 1993 zur Quantifizierung vertikaler Turbulenzprozesse in der städtischen Grenzschicht entsprechende Turmmessungen vorgenommen (FEIGENWINTER et al. 1999).

Seit den 1970/80er Jahren wurde der Gesundheit der Stadtbevölkerung immer stärkere Beachtung geschenkt. Diesem human-biometeorologischen Forschungsgebiet widmeten sich nicht nur Universitäten, sondern auch entsprechende Fachvereinigungen, wie die *International Society*



Abbildung 12-9: Messwagen der Abteilung „Angewandte Klimatologie“ der Universität Duisburg-Essen zur Erfassung meteorologischer sowie gas- und partikelförmiger Luftinhaltsstoffe (Foto: Markus Nekes).

for *Biometeorology* (ISB), in zunehmendem Maße. In Deutschland waren es insbesondere Gerd Jendritzky (JENDRITZKY et al. 1979), Helmut Mayer und Peter Höppe (MAYER und HÖPPE 1987), die wegweisende Arbeiten zu körperphysiologischen Reaktionen auf den thermischen Wirkungskomplex veröffentlichten. Auf diesen bauten spätere Arbeiten zur Standardisierung von Indizes zur Wärmebelastung auf (zum Beispiel DeFREITAS und GRIGORIEVA 2015). Auch für den lufthygienischen Wirkungskomplex wurden in der Folgezeit entsprechende Standards geschaffen (beispielsweise MAYER 2006), wobei nicht nur der Analyse der gasförmigen, sondern auch der partikulären Luftinhaltsstoffe in der Stadtatmosphäre zunehmend Beachtung geschenkt wurde (WEBER et al. 2006).

Auch Einzelprojekte, wie dasjenige in Deutschland zum „Stadtklima Bayern“ (MAYER 1988) oder das kurz nach der Jahrtausendwende in der Schweiz durchgeführte *Basel Urban Boundary Layer Experiment* (BUBBLE; ROTACH et al. 2005) zur Analyse der Meteorologie der urbanen Grenzschicht führten zu einem immer besseren Verständnis vor allem der dreidimensional ablaufenden Prozesse innerhalb der Stadtatmosphäre. Bei diesem und folgenden Projekten griff man nicht nur auf mikrometeorologische Daten mehrerer Messtürme zurück (Abb. 12-8), sondern ergänzte diese mit Tracer- und Windkanalexperimenten (PLATE 1982), Vertikalsondierungen, Fernerkundungsdaten, mikro- und mesoskaligen Modellierungen (GROSS und ETLING 2003) und durch mobile Messungen mittels eines Messwagens (Abb. 12-9) (CHRISTEN 2005, ROTACH et al. 2005, EMEIS et al. 2007, FOKEN et al. 2023).

3.4 Aktualität und Ausblick

Vor dem Hintergrund des voranschreitenden anthropogenen Klimawandels und dessen Folgen, fällt der Stadtklimatologie seit Anbruch des 21. Jahrhunderts eine besondere Aufmerksamkeit, auch in gesellschaftlicher Hinsicht, zu

(MAYER und MATZARAKIS 2003; Tabelle 12-2). Einerseits sind Städte aufgrund der Bündelung wirtschaftlicher Aktivitäten für mehr als 70 % der anthropogenen Treibhausgasemissionen verantwortlich (IEA 2012, IIASA 2012), wodurch sie in den Fokus von Studien zur quantitativen Erfassung von CO₂ in der urbanen Grenzschicht (CRAWFORD und CHRISTEN 2015; KORDOWSKI und KUTTNER 2010) sowie zu dessen Reduktionsmöglichkeiten rücken (HEUSINGER und WEBER 2017). Andererseits werden die Auswirkungen des Klimawandels durch bauliche, klimatische und lufthygienische Eigenheiten von Städten verstärkt und stellen ein Risiko für die Gesundheit der Stadtbevölkerung sowie für die städtische Infrastruktur dar. Entsprechend nehmen Studien zu urbanen Anpassungsstrategien an Klimafolgen einen zunehmend bedeutenden Anteil der aktuellen Forschungs- und Publikations-tätigkeit innerhalb der Stadtklimatologie ein.

Das Thema der Klimaanpassung und zum Beispiel die Quantifizierung von Hitzereduzierungsoptionen wird zunehmend als notwendige Maßnahme wahrgenommen und liegt nicht nur im Fokus von Großstädten, sondern auch vieler wachsender Stadtgemeinden und Agglomerationen. Aufgrund der Verfügbarkeit präziser georeferenzierter Datenquellen auf lokaler, nationaler und internationaler Ebene hat sich die Erforschung der physisch-strukturellen Eigenschaften von Städten deutlich verbessert. Basierend auf Arbeiten in Deutschland, Österreich und der Schweiz sowie durch internationale Initiativen werden meist miteinander vergleichbare und hochauflösende Datensätze für städtische Gebiete generiert, welche in diversen flächennutzungsspezifischen Untersuchungen oder Rastermodelle einfließen können. Weitreichende Entwicklungen lassen die messende Stadtklimatologie immer stärker auch zu einer modellierenden und interdisziplinären Forschungsausrichtung werden.

Numerische Modelle spielen heutzutage besonders in der Stadtentwicklung bzw. Stadtplanung eine große Rolle, da mit ihrer Hilfe nicht nur räumlich hochaufgelöste und flächendeckende Informationen erstellt werden, sondern zahlreiche Szenarien in Hinblick auf die Urbanisierung, den Klimawandel sowie deren Wechselwirkungen untersucht werden können. Eine federführende Rolle spielt in Österreich Maja Žuvela-Aloise, die die ersten und zahlreichen Stadtklimaanalysen und Modellierungsstudien unter anderem zur Untersuchung der Wirksamkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen mit dem vom Deutschen Wetterdienst entwickelten MUKLIMO_3-Modell (SIEVERS und ZDUNKOWSKI 1986) für österreichische Städte durchgeführt hat (ZUVELA-ALOISE et al. 2014, 2016, 2017). In Deutschland wurden zum Beispiel verschiedene räumlich hochauflösende numerische Modelle für die Lösung stadtklimatischer Probleme entwickelt (GROSS 2014, 2019, 2021; SCHLÜNZEN et al. 2016), wie das auf der *Large Eddy Simulation* (LES) beruhende *Parallelized LES Model for urban application* (PALM-4U; RAASCH und SCHRÖTER 2001, SCHERER et al. 2019, MARONGA et al. 2019).

Tabelle 12-2: Überblick über die Stadtklimaforschung im 20. und 21. Jahrhundert (nach YOSHINO 1990/91, OKE et al. 2017; ergänzt und verändert).

Bezugszeitraum	Fortschritte in der Stadtklimaforschung
Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts	<ul style="list-style-type: none"> • Überwiegend deskriptiv gehaltene Klimatographien einzelner Städte
	<ul style="list-style-type: none"> • Neben Untersuchungen im Bereich der Luftverschmutzung vermehrte Analysen zum Thema Hitzebelastung in Städten
	<ul style="list-style-type: none"> • Stadt-Umland-Vergleichsanalysen, vor allem im Bereich der Phänologie
Mitte bis Ende des 20. Jahrhunderts	<ul style="list-style-type: none"> • Stürmische Entwicklung der Stadtklimatologie, dokumentiert in zahlreichen Bibliographien z. B. durch die WMO (<i>World Meteorological Organisation</i>)
	<ul style="list-style-type: none"> • Von der WHO (<i>World Health Organisation</i>) durchgeführte Tagungen (z. B. Brüssel 1968, <i>“Urban Climates and Building Climatology”</i>) sowie Symposien der IFHP (<i>International Federation for Housing and Planning</i>)
	<ul style="list-style-type: none"> • Verfeinerung und Verbesserung von Messgeräten erlaubten bessere methodische Differenzierung von und stärkere analytische Herangehensweise an Stadtklimauntersuchungen
	<ul style="list-style-type: none"> • Dreidimensionale Erfassung klimatischer und lufthygienischer Parameter in der urbanen Grenzschicht
	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkte Nutzung von Fernerkundungsmethoden
	<ul style="list-style-type: none"> • Numerische Simulationen und Windkanalanalysen
	<ul style="list-style-type: none"> • Anfertigung von Stadtklimakarten, Einführung des Begriffes „Klimatop“ (in Deutschland); Aufkommen von Stadtklimaatlantent
	<ul style="list-style-type: none"> • Publikation umfangreicher Bibliographien zur Stadtklimaliteratur
	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse stadtbedingter Niederschläge
	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitative und quantitative Analyse anthropogener Wärme (Industrie, Gebäudebeheizung, Kfz-Verkehr, metabolische Wärme)
	<ul style="list-style-type: none"> • Typisierung der urbanen Wärmeinseln (Untergrund, Oberfläche, Atmosphäre)
	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkte Durchführung von Stadtklimaanalysen auch in Entwicklungsländern
	<ul style="list-style-type: none"> • Entstehung verschiedener Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI RL) im Fachbereich „Umweltmeteorologie“
<ul style="list-style-type: none"> • Prozessorientierte Arbeiten zu urbanen Austauschprozessen (Flußmessungen meteorologischer und lufthygienischer Parameter mittels Eddy-Kovarianz-Methode) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Ausweitung human-biometeorologischer Forschung; Schaffung von Indikatoren zum thermischen Wirkungskomplex (z. B. PET, pt, UTCI); Festlegung von Grenzwerten zum lufthygienischen Wirkungskomplex 	

Bezugszeitraum	Fortschritte in der Stadtklimaforschung
Ende des 20. und Anfang des 21. Jahrhunderts	<ul style="list-style-type: none"> • Stadtklima und globaler Klimawandel; Mitigations- und Adaptationsstrategien für Städte; Auswirkung der Urbanisierung
	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärktes Aufkommen räumlich hochauflösender numerischer Modelle für stadtmeteorologische Vorhersagen (beispielsweise das auf der <i>Large Eddy Simulation</i> (LES) beruhende Modell <i>Parallelized LES Model for urban application</i> (PALM-4U))
	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Bedarf an großen Rechenkapazitäten in der Modellierungsgemeinschaft, verstärkte Nutzung von effizienten Algorithmen und Techniken im Umgang mit großen Datensätzen
	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung der lokalen, nationalen und internationalen Datengrundlage für Stadtklimaanalysen zur Beschreibung von räumlichen Strukturen, Formen und Mustern der Städte (z. B. <i>COPERNICUS High Resolution Layers</i>, <i>Urban Atlas</i>, <i>Local Climate Zones</i>)
	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendungsorientierte Forschung, interdisziplinäre Untersuchungen (z. B. Berücksichtigung sozioökonomischer Aspekte, Kosten-Nutzen-Analyse von Anpassungsmaßnahmen)
	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Städteparametrisierung in operationellen numerischen Vorhersagemodellen (z. B. <i>TEB Model</i> von Masson)
	<ul style="list-style-type: none"> • Vermehrte internationale und interdisziplinäre Zusammenarbeit
	<ul style="list-style-type: none"> • Intensiver Austausch zwischen Experten aus Wissenschaft, Forschung und Verwaltung auf dem Gebiet der Stadtklimatologie (z. B. Kooperationen im Rahmen von Forschungsprojekten, Entwicklung des UHI-Strategieplans, Förderprogramm „Stadt der Zukunft“, Anstellung von Stadtklimatologen in Städten, Klimadirektor Wien)
	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von technologischen und natürlichen Lösungen zur Reduzierung der Hitze in der Stadt (z. B. reflektierende Materialien, thermische Sanierung von Gebäuden, Schwammstadt-Prinzip, klimafitte Bäume), Umsetzung vor allem im Rahmen von Einzelstudien und Pilotprojekten
	<ul style="list-style-type: none"> • Bedarf an Steuerungsinstrumenten sowie Grenz-, Kenn- und Zielwerte, um stadtklimatische Auswirkungen von (Städte-) Bauvorhaben und -Projekten nachvollziehbar und schlüssig abzuschätzen, bzw. Qualitäten rechtlich bindend vorzugeben
	<ul style="list-style-type: none"> • Zunehmende Verfügbarkeit kostengünstiger und gleichzeitig qualitativ hochstehende Messtechnik (<i>Low-Cost</i>)
	<ul style="list-style-type: none"> • Einbezug von Daten aus privaten Wetterstationen (<i>Crowdsourcing-based data</i>)
	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von bodengestützten Fernerkundungsverfahren (z. B. Doppler-Wind-LIDAR, ALCs)
<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von Methoden der Künstlichen Intelligenz (z. B. neuronale Netzwerke) 	

Um die Güte von numerischen Modellen bestimmen zu können, sind räumlich und zeitlich hochaufgelöste Messdaten unverzichtbar. Qualitativ hochwertige Messungen zur Erfassung thermischer Eigenschaften von Städten sind vor allem aus finanziellen Gründen nicht realisierbar. Die Ausrüstung der Bevölkerung mit kostengünstigen Sensoren zur Beobachtung atmosphärischer Bedingungen bietet in städtischen Gebieten aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte große Potenziale und ihre Anwendbarkeit für stadtklimatische Fragestellungen wurde initiativ in Berlin etabliert (MEIER et al. 2017) und anschließend in verschiedenen

europäischen Ländern realisiert (NAPOLY et al. 2018). Bei diesen über das Internet zugänglichen Messnetzen und „Crowdsourcing-based“ Daten muss davon ausgegangen werden, dass sie nicht den Qualitätsstandards der traditionellen Messungen entsprechen. Diese können jedoch nach entsprechender Kontrolle – zum Beispiel anhand des Datenabgleichs mit offiziellen Beobachtungsstationen – vermehrt zur Analyse der aktuellen stadtklimatischen Gegebenheiten eingesetzt werden (FEICHTINGER et al. 2020, FENNER et al. 2021, HOLLÓSI et al. 2021, MEYER et al. 2021).

Beispielhaft für diese Entwicklung kann das stadtklimatologische Messnetz des Geographischen Instituts der Universität Bern aufgeführt werden, welches auf Basis von *Low-Cost*-Temperatursensoren sowie selbstgebauten Strahlungsschutzgehäusen die sommerliche Temperaturvariabilität in und um Bern festhält (GUBLER et al. 2021). Ähnliche Messnetze wurden auch in Berlin, Freiburg/Breisgau, Basel und in Zürich errichtet.

Universitätsinstitute aus den D-A-CH-Ländern widmeten sich auch maßgeblich internationalen Forschungs Kooperationen und weiteten den Untersuchungsfokus auf Städte anderer Länder aus. So beispielsweise die Forschungsgruppe um Eberhard Parlow an der Universität Basel im Kontext des Horizon 2020 Projekts *URBAN ANthropogenic heat FLUX from Earth observation Satellites* (URBAN-FLUXES), bei dem Basel als eine von mehreren Fallbeispiel-Städten fungierte (CHRYSOULAKIS et al. 2018, FEIGENWINTER et al. 2018) oder das Horizon 2020 Projekt *Integrated Climate Adaptation Service Tools for Improving Resilience Measure Efficiency* (CLARITY) mit der Beteiligung der ZAMG, in dem unter anderem neben der Pilotstadt Linz eine Stadtmodellierung für Neapel durchgeführt wurde.

An der ETH Zürich fokussierte man sich indes einerseits seit 2010 auf den Auf- und Ausbau eines multidisziplinären und internationalen Forschungszentrums in Singapur, an dem die Untersuchung und Modellierung der städtischen Wärmeinsel sowie entsprechender Minderungsmaßnahmen einen zentralen Teil der Forschungstätigkeit einnimmt (*Cooling Singapore*; siehe zum Beispiel MUGHAL et al. 2020, CHEW et al. 2021). Andererseits beschäftigte man sich auch mit Analysen großer Satellitendatensätze hinsichtlich der Kühlwirkung von grüner Infrastruktur in europäischen Städten (SCHWAAB et al. 2021). Aus diesen Entwicklungen lässt sich ein klarer Trend hin zu einer stärkeren Diversifizierung und Internationalisierung der Stadtklimaforschung ableiten.

4 Fazit

In summa zeigt der Rückblick auf die Entwicklung der Stadtklimatologie im D-A-CH-Raum, dass in den letzten rund 150 Jahren eine Vielzahl von Einzelpersonen sowie Forschungsgruppen und -institutionen grundlegende und teils wegweisende wissenschaftliche Erkenntnisse beisteuerten.

Vor dem Hintergrund einer zunehmend ausgereifteren stationären und mobilen Messtechnik, der stürmischen Weiterentwicklung numerischer und physikalischer Modellierungen, 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 be-

deutendere Rolle spielten. In Deutschland schlugen sich diese Ergebnisse nicht nur in entsprechenden Publikationen nieder (KATZSCHNER und MÜLDER 2008), 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 (beispielsweise VDI 3785, 3787, 3789), die sich vorrangig auf die Umweltmedien „Klima und Luft“ beziehen. Klimatische und lufthygienische Aspekte sind feste Bestandteile der räumlichen Planung; der Bedarf an Planungshinweiskarten und -empfehlungen ist steigend. Heutzutage basieren die Studien vermehrt auf modellgestützten Analysen der bioklimatischen und umweltmeteorologischen Belastungen, um ein fachlich fundiertes Instrument zur vorsorgeorientierten Umweltplanung zur Verfügung zu stellen.

Mit Blick auf die Vergangenheit lässt sich erahnen, dass die Forschungsgemeinschaft in Deutschland, Österreich und der Schweiz vor dem Hintergrund einer immer stärkeren Beachtung und Relevanz stadtklimatologischer Fragestellungen auch in Zukunft eine prominente Rolle spielen wird – sowohl für lokale Betrachtungen wie auch auf dem internationalen Parkett.

Literatur

AUER, I., BÖHM, R., MOHNL, H., 1989: Klima von Wien – Eine anwendungsorientierte Klimatographie. Magistrat der Stadt Wien (Hrsg.), *Beiträge zur Stadtforschung, Stadtentwicklung und Stadtgestaltung* **20**, 270 S.

BEHRE, O., 1908: Das Klima von Berlin. Eine meteorologisch-hygienische Untersuchung. *Otto Sale*, Berlin, 158 S.

CHEW, L.W, LIU, X., NORFORD, L.K., 2021: Interaction between heat wave and urban heat island: A case study in a tropical coastal city, Singapore. *Atmospheric Research* **247**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105134.

CHRISTEN, A., 2005: Atmospheric turbulence and surface energy exchange in urban environments: results from the Basel Urban Boundary Layer Experiment (BUBBLE). Dissertation, Universität Basel, 142 S., doi: 10.5451/unibas-003631734.

CHRYSOULAKIS, N., GRIMMOND, S., FEIGENWINTER, C. et al., 2018: Urban energy exchanges monitoring from space. *Scientific Reports* **8**, doi: 10.1038/s41598-018-29873-x.

CRAWFORD, B., CHRISTEN, A., 2015: Spatial source attribution of measured urban eddy covariance CO₂ fluxes. *Theoretical and Applied Climatology* **119**, 733-755, doi: 10.1007/s00704-014-1124-0.

DEFILA, C., CLOT, B., 2001: Phytophenological trends in Switzerland. *Int. J. Biometeorol.* **45**, 203-207.

DE FREITAS, C.R., GRIGORIEVA, E.A., 2015: A comprehensive Catalogue and Classification of human thermal Climate Indices. *Int. J. Biometeorol.* **59**, 109-120.

- DOMRÖS, M., 1966: Luftverunreinigung und Stadtklima im Rheinisch-Westfälischen Industriegebiet und ihre Auswirkung auf den Flechtenbewuchs der Bäume. *Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde* **23**.
- EMEIS, S., BAUMANN-STANZER, K., PIRINGER, M., KALLISTRATOVA, M., KOUZNETSOV, R., YUSHKOV, V., 2007: Wind and turbulence in the urban boundary layer – analysis from acoustic remote sensing data and fit to analytical relations. *Meteorol. Z.* **16**, 393-406.
- EVELYN, J., 1661: Fumifugium: Or the inconvenience of the aer and smoak of London dissipated. Published by His Majesties command, Printed by W. Godbid for Gabriel Bedel and Thomas Collins, London, 43 S.
- FEICHTINGER, M., DE WIT, R., GOLDENITS, G., KOLEJKA, T., HOLLÓSI, B., ŽUVELA-ALOISE, M., FEIGL, J., 2020: Case-study of neighborhood-scale summertime urban air temperature for the City of Vienna using crowd-sourced data. *Urban Climate* **32**, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100597.
- FEIGENWINTER, C., VOGT, R., PARLOW, E., 1999: Vertical structure of selected turbulence characteristics above an urban canopy. *Theoretical and Applied Climatology* **62**, 51-63, doi: 10.1007/s007040050074.
- FEIGENWINTER C., VOGT, R., PARLOW, E., LINDBERG, F., MARCONCINI, M., DEL FRATE, F., CHRYSOULAKIS, N., 2018: Spatial Distribution of Sensible and Latent Heat Flux in the City of Basel (Switzerland). *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **11**, 2717-2723, doi: 10.1109/JSTARS.2018.2807815.
- FENNER, D., BECHTEL, B., DEMUZERE, M., KITTNER, J., MEIER, F., 2021: CrowdQC+ – A Quality-Control for Crowdsourced Air-Temperature Observations Enabling World-Wide Urban Climate Applications. *Frontiers in Environmental Science* **9**, doi: 10.3389/fenvs.2021.720747.
- FENSTERBUSCH, C. (Hrsg.), 1991: De architectura libri decem (Autor: Vitruvius). *Wiss. Buchgesell.*, Darmstadt, 585 S.
- FIEDLER, F., 1992: Das Regio-Klima-Projekt. Wie regeln die natürlichen Energieumsetzungen das Klima in einer Region? *KfK-Nachrichten* **24**, 125-131.
- FOKEN, T., PARLOW, E., GROSS, G., LEITL, B., 2023: Untersuchungsmethoden zum Stadtklima. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 97-114.
- GROSS, G., 2014: Observations and numerical simulations of the train-induced air flow in a subway station. *Meteorol. Z.* **10**, 535-546.
- GROSS, G., 2019: On the self-ventilation of an urban heat island. *Meteorol. Z.* **28**, 87-92.
- GROSS, G., 2021: A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area. *Meteorol. Z.* **30**, 227-236.
- GROSS, G., ETLING, C., 2003: Numerische Simulationsmodelle. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **30**, 28-38.
- GUBLER, M., CHRISTEN, A., REMUND, J., BRÖNNIMANN, S., 2021: Evaluation and application of a low-cost measurement network to study intra-urban temperature differences during summer 2018 in Bern, Switzerland. *Urban Climate* **37**, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100817.
- GUDERIAN, R., 1986: Kriterien zur Erfassung und Bewertung von Immissionsbelastungen in terrestrischen Ökosystemen. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* **14**, 245-256.
- HAMMERL, C., 2005: 40 Jahre KRL – Kommission für Reinhaltung der Luft der Österreichischen Akademie der Wissenschaften 1962-2002. *Facultas Verlags- & Buchhandels AG*.
- HANN, J., 1885: Über den Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land. *Zeitschrift der österr. Gesellschaft für Meteorologie* **20**, 457-465.
- HANN, J., SÜRING, R., 1915: Lehrbuch der Meteorologie. 3. Auflage. *Chr. H. Tauchnitz*, Leipzig.
- HELBIG, A., BAUMÜLLER, J., KERSCHGENS, M.J. (Hrsg.), 1999: Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. A., *Springer*, Berlin, 467 S.
- HEUSINGER, J., WEBER S., 2017: Extensive green roof CO₂ exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements. *Science of the Total Environment* **607/608**, 623-632.
- HOLLÓSI, B., ŽUVELA-ALOISE, M., OSWALD, S., KAINZ, A., SCHÖNER, W., 2021: Applying urban climate model in prediction mode – evaluation of MUKLIMO_3 model performance for Austrian cities based on the summer period of 2019. *Theoretical and Applied Climatology* **144**, 1181-1204, doi: 10.1007/s00704-021-03580-6.
- HOWARD, L., 1833: The Climate of London deduced from meteorological observation, 2nd ed., *Harvey and Darton*.
- IEA, 2012: World Energy Outlook 2012. International Energy Agency (IEA), Paris, Frankreich, Abruf am 25.04.2023, URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2012>.
- IIASA, 2012: Global Energy Assessment (GEA) 2012 – Toward a Sustainable Future. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria und Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, USA. Abruf am 21.06.2023, URL: http://assets.cambridge.org/97811070/05198/frontmatter/9781107005198_frontmatter.pdf.
- 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., HEBBERT, M., 2012: Hidden climate change-urban meteorology and the scales of real weather. *Climatic Change* **113**, 23-33.
- JENDRITZKY, G., SOENNING, W., SWANTES, H.-J., 1979: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung. *Beitrag ARL* **28**.
- KASSNER, C., 1910: Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaus. 3. Vortragszyklus „Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaus“, *Städtebauliche Vorträge* Band III, Heft VI, 1-26.

KATZSCHNER, L., MÜLDER, J., 2008: Regional climatic mapping as a tool for sustainable development. *Journal of Environmental Management* **87/2**, 262-267.

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

KORDOWSKI, K., KUTTLER, W., 2010: Carbon dioxide fluxes over an urban park area. *Atmospheric Environment*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.04.039.

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

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

KUTTLER, W., 1979b: Einflussgrößen gesundheitsgefährdender Wetterlagen und deren bioklimatische Auswirkungen auf potentielle Erholungsgebiete. *Bochumer Geogr. Arbeiten* **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*, 105-146, doi: 10.5772/50867.

KUTTLER, W., GROSS, G., 2023: Charakteristika des Stadtklimas. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 3-13.

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

KUTTLER, W., WEBER, S., 2023: Characteristics and phenomena of the urban climate. *Meteorol. Z. (early access article)*.

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

LAUSCHER, F., 1984: Ozonbeobachtungen in Wien von 1853 bis 1981. Zusammenhänge zwischen Ozon und Wetterlagen. ZAMG (Hrsg.), *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik* **284**, 29 S.

LISAC, I., VUJNOVIC, V., MARKI, A., 2010: Ozone measurements in Zagreb, Croatia, at the end of 19th century compared to the present data. *Meteorol. Z.* **19**, 169-178.

LODEWIG, F., 1939: Die Bedeutung der Grünanlagen dargestellt am Beispiel der Stadt Basel. *Das Werk: Architektur und Kunst* **26-4**, 105-114.

LODEWIG, F., 1957: Das Stadtklima. *Schweizerische technische Zeitschrift* **54**, 960-961.

MARONGA, B., GROSS, G., RAASCH, S. et al., 2019: Development of a new urban climate modell based on the modell PALM. *Meteorol. Z.*, doi:10.1127/metz/2019/0909.

MATHYS, H., MAURER, R., MESSERLI, B., WANNER, H., WINIGER, M., 1980: Klima und Lufthygiene im Raum Bern – Resultate des Forschungsprogramms KLIMUS und ihre Anwendung in der Raumplanung. *Geographica Bernensia* **G 12**, Universität Bern, 55 S., doi: 10.4480/GB2019.G12.

MAYER, H., 1988: Results from the Research Program “STADTKLIMA BAYERN” for Urban Planning. *Energy and Buildings* **11**, 115-121.

MAYER, H., 2006: Indizes zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen und lufthygienischen Komponente des Klimas. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **66**, 165-174.

MAYER, H., HÖPPE, P., 1987: Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* **38**, 43-49.

MAYER, H., MATZARAKIS, A., 2003: Zukunftsperspektiven der Umweltmeteorologie. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **30**, 57-66.

MEIER, F., FENNER, D., GRASSMANN, T., OTTO, M., SCHERER, D., 2017: Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Climate* **19**, 170-191, doi: 10.1016/j.uclim.2017.01.006.

MEYER, L., GUBLER, M., MEIER, F., BRÖNNIMANN, S., 2021: Intercomparison and combination of low-cost urban air temperature measurement approaches. *Meteorol. Z.* **31**, 131-148, doi: 10.1127/metz/2021/1107.

MUGHAL, M.O., LI, X.-X., NORFORD, L.K., 2020: Urban heat island mitigation in Singapore: Evaluation using WRF/multilayer urban canopy model and local climate zones. *Urban Climate* **34**, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100714.

NAPOLY, A., GRASSMANN, T., MEIER, F., FENNER, D., 2018: Development and application of a statistically-based quality control for crowdsourced air temperature data. *Frontiers in Earth Science* **6**, doi: 10.3389/feart.2018.00118.

NEUMANN, J., 1979: Air pollution in Ancient Rome. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **60**.

NEUREITER, A., 2018: Temperaturmessfahrten Februar 1932 und 2018 – Auswirkungen geänderter Verbauung auf den Temperaturverlauf. Bachelorarbeit, Universität Wien, 44 S.

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

PARLOW, E., 1992: REKLIP – Klimaforschung statt Meinungsmache am Oberrhein. *Regio Basiliensis* **33-2**, 71-80.

PARLOW, E., 1994: Faktoren und Modelle für das Klima am Oberrhein. Das Regio-Klima-Projekt REKLIP. *Geographische Rundschau* **3-94**, 160-167.

PARLOW, E., 1996: The regional climate project REKLIP – an overview. *Theoretical and Applied Climatology* **53**, 3-7.

PARLOW, E., 1999: Stadtklimaforschung in der Schweiz. In: Stadtklima und Luftreinhaltung (VDI-Buch). HELBIG, A., BAUMÜLLER, J., KERSCHGENS, M.J. (Hrsg.), Springer, Berlin und Heidelberg, 419-425.

PARLOW, E., SCHERER, D., BEHA, H.D., GOSSMANN, H., BRAUN, M., 1996: Urban climatological parameters derived from multisensor satellite data of ERS-1 and Landsat-TM. European Space Agency, *ESA-SP* **383**, 173-178.

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

PLATE, E., 1982: Engineering meteorology. *Elsevier Scientific Publ.*, Amsterdam, 740 S.

- RAASCH, S., SCHRÖTER, M., 2001: PALM – A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorol. Z.* **10**, 363-372.
- ROETZER, T., WITTENZELLER, M., HAECKEL, H., NEKOVAR, J., 2000: Phenology in central Europe – differences and trends of spring phenophases in urban and rural area. *Int. J. Biometeorol.* **44**, 60-66.
- ROTACH, M., 1994: Determination of the zero plane displacement in an urban environment. *Boundary Layer Meteorology* **67**, 187-193.
- ROTACH, M., VOGT, R., BERNHOFER, C. et al., 2005: BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology* **81**, 231-261, doi: 10.1007/s00704-004-0117-9.
- SCHERER, D., AMENT, F., EMEIS, S., FEHRENBACH, U., LEITL, B., SCHERBER, K., SCHNEIDER, C., VOGT, U., 2019: Three-Dimensional Observation of Atmospheric Processes in Cities. *Meteorol. Z.* **28**, 121-138, doi: 10.1127/metz/2019/0911.
- SCHERER, D., FEHRENBACH, U., PARLOW, E., BEHA, H.D., 1996: Determination of aggregated areal types from a Landsat-TM and ERS-1 based land-use classification for the agglomeration of Basel/ Switzerland. In: Progress in Environmental Remote Sensing Research and Applications. PARLOW, E. (Hrsg.), Rotterdam, 197-200.
- SCHIRMER, H., KUTTLER, W., LÖBEL, J., WEBER, K. (Hrsg.), 1993: Lufthygiene und Klima. *VDI-Verlag*, Düsseldorf, 507 S.
- SCHLÜNZEN, K.H., CONRADY, K., PURR, C., 2016: Typical performances of mesoscale meteorology models. *Air Pollution Modeling and its Application XXIV*, STEYN, D.G., CHAUMERLIAC, N. (Hrsg.), 447-457, doi: 10.1007/978-3-319-24478-5_72.
- SCHMID, H.P., 1984: Das horizontale Windfeld über dem Gebiet der Stadt Zürich. *Zürcher Geographische Schriften* **16**.
- SCHMIDT, W., 1930: Kleinklimatische Aufnahmen durch Temperaturfahrten. *Meteorol. Z.* **47**, 92-106.
- SCHUHMACHER, P., 1984: Windprofil über dem Stadtzentrum von Zürich. *Zürcher Geographische Schriften* **17**.
- SCHWAAB, J., MEIER, R., MUSSETTI, G., SENEVI-RATNE, S., BÜRGI, C., DAVIN, E.L., 2021: The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature Communications* **12**, doi: 10.1038/s41467-021-26768-w.
- SIEVERS, U., ZDUNKOWSKI, W.G., 1986: A microscale urban climate model. *Beitr. Phys. Atmosph.* **59**, 13-40.
- STEINHAUSER, F., ECKEL, O., SAUBERER, F., 1955, 1957, 1959: Klima und Bioklima von Wien. Teil I (123 S.), Teil II (136 S.), Teil III (136 S.). Österr. Gesell. f. Meteorol. (Hrsg.), Wien.
- STIFTER, A., 1909: Aus dem alten Wien. Otto Erich Deutsch (Hrsg.), *Insel-Verlag*.
- UBA, 2022: Ozon-Belastung. Website des Umweltbundesamtes (UBA). Abruf am 25.04.2023, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/ozon-belastung>.
- VALENTIN, J., 1901: Der tägliche Gang der Lufttemperatur in Österreich. *Denkschriften der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften - Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe* **73**. Jubelband zur Feier des fünfzigjährigen Bestandes der K. K. Centralanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus, Kaiserlich-Königliche Hof- und Staatsdruckerei, Wien.
- VDI, 2023: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Richtlinien zur Umweltmeteorologie, z.B. 3785, 3787, 3789. *Beuth Verlag*, Berlin.
- WANNER, H., 1983: Stadtklimatologie und Stadtklimastudien in der Schweiz. *Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft Bern*, 96-111.
- WANNER, H., 1991: Biel – Klima und Luftverschmutzung einer Schweizer Stadt. *Verlag P. Haupt*, Bern und Stuttgart.
- WANNER, H., HERTIG, J.-A., 1984: Studies of Urban Climates and Air Pollution in Switzerland. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **23**, 1614-1625.
- WEBER, S., KUTTLER, W., WEBER, K., 2006: Flow characteristics and particle mass and number concentration variability within a busy urban street canyon. *Atmospheric Environment* **40**, 7565-7578.
- WILD, H., 1881: Die Temperaturverhältnisse des Russischen Reiches. *Kaiserliche Akademie der Wissenschaften*, St. Petersburg und Leipzig.
- WINIGER, M., NEJEDLY, G., SCHWAB, Z., 1982: Satellitendaten in der Geländeklimatologie – Resultate des Projektes «Heat Capacity Mapping Mission» (HCCM). *Geographica Helvetica* **37**, 199-207.
- WOLF, R., 1855: Über den Ozongehalt der Luft und seinen Zusammenhang mit der Mortalität. Vorträge gehalten in der bernischen naturforschenden Gesellschaft, Bern.
- WURZLER, S., HEBBINGHAUS, H., ROGALLA, L., BECK, N., KLOSTERKÖTHER, A., GEIGER, J., 2023: Entwicklung der Luftqualität in der Metropolregion Rhein-Ruhr. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), *promet* **106**, 51-60.
- YOSHINO, M., 1990/91: Development of urban climatology and problems today. *Energy and Buildings* **15**, 1-10.
- ŽUVELA-ALOISE, M., ANDRE, K., SCHWAIGER, H., BIRD, D. N., GALLAUN, H., 2017: Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. *Theoretical and Applied Climatology* **131**, 1005-1018, doi: 10.1007/s00704-016-2024-2.
- ŽUVELA-ALOISE, M., KOCH, R., BUCHHOLZ, S., FRÜH, B., 2016: Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change* **135**, 425-438, doi: 10.1007/s10584-016-1596-2.
- ŽUVELA-ALOISE, M., KOCH, R., NEUREITER, A., BÖHM, R., BUCHHOLZ, S., 2014: Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to the early instrumental period. *Urban Climate* **10**, 490-508, doi: 10.1016/j.uclim.2014.04.002.

Kontakt

PROF. DR. WILHELM KUTTNER
Universität Duisburg-Essen
Angewandte Klimatologie
Universitätsstr. 2
45141 Essen
wikutt@outlook.de

BRIGITTA HOLLÓSI, M.Sc.
GeoSphere Austria (ehemals Zentralanstalt für
Meteorologie und Geodynamik)
Fachabteilung Stadtmodellierung
Hohe Warte 38
1190 Wien
Österreich
brigitta.hollosi@geosphere.at

DR. MORITZ GUBLER
Universität Bern
Geographisches Institut
Hallerstrasse 12
3012 Bern
Schweiz
moritz.gubler@unibe.ch

Examina im Jahr 2022

Bachelor-, Diplom- und Masterarbeiten, Dissertationen und Habilitationen in der Meteorologie und verwandten Fächern aus dem deutschsprachigen Raum

Universität Basel

Bachelorarbeiten

MUTTI, Miriam: Leaf Area Index Estimation from Aerial LiDAR over Basel City Center.

ZURFLUH, Nicolas: Post processing of two years of eddy covariance flux data over a grassland ecosystem.

Masterarbeiten

BREGENZER, Pascal: Implementation of Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS) and Solar and Longwave Environmental Irradiance Geometry model (SOLWEIG) for two investigation areas in Basel.

ZURBRIGGEN, Etienne: Urban biogenic CO₂-flux estimation across the parks of Basel.

Universität Bayreuth

Bachelorarbeiten

BERNERT, Lina: Energy and Carbon fluxes on a agricultural site to be transformed to a photovoltaic power plant.

LEIMEISTER, Anika: Mikroklimatische Variabilität in einer Mittelgebirgstalage und deren Auswirkungen auf die Homogenität von Messreihen bei wechselnden Standorten.

STOCKER, Max: Einfluss von Wasseroberflächen und platzende Gasblasen auf die oberflächennahe Turbulenz im Windkanal.

Masterarbeit

ARZBERGER, Sophie: Mikroklimatische Untersuchungen zum Potential von Filtersystemen zur Reinigung der Stadtluft.

Dissertation

ESDERS, Eike: Verhalten von Mikroplastik im System Landoberfläche-Atmosphäre und gegliedertem Gelände.

Freie Universität Berlin

Bachelorarbeiten

9 Arbeiten

Masterarbeiten

10 Arbeiten

Dissertationen

4 Arbeiten

Universität Bonn

Bachelorarbeiten

KRACHELETZ, Magdalena: Atmosphärische Massenvariationen während des westeuropäischen Flutereignisses im Juli 2021 und ihre Auswirkung auf die Schwerefeldmessung der GRACE-FO Satellitenmission.

MÜSSELER, Vincent: Risikoanalyse für richtungsabhängige Windextrems für das Bonner Seilbahn-Projekt anhand von COSMO-REA6 Daten.

SOLANO MARCHINI, Jose Pablo: Influence of microphysics schemes on the structure and intensity of a developing squall line.

SPERSCHNEIDER, Aaron: Einfluss der Orographie von Mittelgebirgen auf die Verbreitung und Intensität von hochreichender Feuchtkonvektion.

Masterarbeiten

FOHRMANN, Till: Investigation of the impact of heat-waves on the planetary boundary layer.

WEICHSELBAUM, Falco: Deep neural network techniques for weather forecasting.

Dissertationen

BUSCHOW, Sebastian: Spatial verification with wavelets.

EMMERICH, Tamara: On the importance of meteorological parameters in processes affecting the chemical composition of the troposphere.

Universität Bremen

Bachelorarbeiten

AUTH, Elina: Luftverschmutzung in Bremen Oslebshausen und Urlaubsregionen Deutschlands.

ISSELHORST, Liliane: Frequency Analysis of Hydrological Data in the Amazon Basin.

RUDOLF, Lisa: Analyse der Schadstoffbelastung hinsichtlich verkehrsbeschränkter Bereiche in ausgewählten deutschen Städten.

TREPPER, Florian: Untersuchung der zeitlichen Variationen von gelöstem organischen Kohlenstoff in der Elbe.

ULRICH, Phil: Analyse der Luftqualität in Großstädten.

Masterarbeiten

GARTELMANN, Lukas: Arctic Surface Energy Budget during a Moist Intrusion in Past, Present and Future Climates.

MASSENBACH, Martin von: Einsatz von Mikrocontrollern in Experimenten im Physikunterricht.

Dissertation

ALBEDYLL, Luisa von: Sea ice deformation and sea ice thickness change.

Technische Universität Dresden

Masterarbeiten

GIEBEL, Franziska: Räumliche Verteilung der nächtlichen Minimumtemperatur im Thüringer Wald bei Spätfrostereignissen.

GRAUMANN, Elena: Energy-focused refurbishment of the university building "Willersbau": effects on the microclimate and bioclimate on hot summer days.

HERZIG, Marie: Klimatische Reichweite von Parks - eine Literatur- und Modellstudie.

LIN, Yu-Chieh: Heat and drought interactions of vegetation with urban climate – case studies with the microclimate model ENVI-met.

MAHMOOD, Abeera Babar: Water Vapour Sources and Pathways for Precipitation Events on the Arabian Peninsula using Lagrangian Analysis.

SIESS, Christiane: Getting Organized – the Diurnal Self-Organization of Mesoscale Convective Systems as a Function of Surface Properties.

VOLKS, Paula: Wirkung von unterschiedlicher Dachbegrünung auf das urbane Mikroklima und die Wärmebelastung.

Dissertationen

LUONG, Thanh Thi: Development of a semi-automatic approach to estimate pre-event soil moisture for Flash Flood Guidance in low mountain ranges (Saxony).

VOROBESKII, Ivan: Modelling the water balance in small catchments: Development of a global application for a local scale.

Universität Frankfurt

Bachelorarbeiten

BEUTNER, Kevin: Vergleichsmessung von urbanen und ländlichen Nanopartikeln mit einem Particle Size Magnifier (PSM).

BEYLICH, Matthias: Predictability of the Indian summer monsoon with Speedy during El Nino and La Nina years.

IVANOVA, Elena: Kalibrierung von Dimethylamin am Chemical Ionisation Atmospheric Pressure interface Time-Of-Flight (CI-API-TOF) Massenspektrometer mit der SCORPION Ionenquelle.

Masterarbeiten

CZAKAY, Christian: Information exchange from marginal seas to Vb-precipitation in MedCORDEX simulations.

ENGLERT, Sina: Assessment of the Climate Impact of Aviation and Pathways towards a Sustainable Future.

HALBIG, Alexander: Diurnal cycle of precipitation along the Himalayan mountain range.

JOCHUM, Felix: Implementing terrain-following coordinates into a semi-implicit pseudo-incompressible flow solver.

MÄRZ, Benedikt: Development of an ensemble-based forecasting tool of hazardous icing conditions for German transmission system operators.

REICHEL, Christopher: Identifying open and closed stratocumulus clouds by their reflectance using a convolutional neural network.

Dissertationen

HOFF, Amelie Simone: Hydro-Climatic Causes of Widespread Floods in Central Europe: On Rain-on-Snow and Vb-

Cyclone Events.

KOHL, Rebecca: In-situ Messungen von eismukleierenden Aerosolen mit dem Eiskeimzähler FINCH.

KRAMER, Isabelle: Adaptation of dengue virus transmitting Aedes mosquitoes to a climate gradient in Central Nepal.

POTHAPAKULA, Praveen K.: Exploring Information Exchange in Climate System and Climate Models.

PURR, Christopher: Towards the Intensification of Convective Rain Events with Rising Temperatures in Germany.

SCHMID, Fabienne: Ein semi-implizites pseudo-inkompressibles Finite-Volumen-Modell zur Simulation diabatischer Atmosphärenprozesse.

Technische Universität Bergakademie Freiberg

Bachelorarbeit

DOBROVSKY, Leonore: Wasserstandsschwankungen und Ökosystemgas-austausch (CO₂, CH₄ und N₂O) – ein neues Versuchsdesign.

Masterarbeiten

ADAM, Séan MP: Ökosystematmung zeitweise trockenfallender Litoralbereiche.

BIBAJ, Esmira: Cadmium and climate-impacted greenhouse gas emissions from agricultural soils.

MALLA, Chaitanya: Climate impacts for water management in Saxony region using a multi-model approach.

Dissertation

MASTRANTONAS, Nikolaos: Use of large-scale atmospheric flow patterns to improve forecasting of extreme precipitation in the Mediterranean region for longer-range forecasts.

Universität Freiburg

Bachelorarbeiten

DAMMERT, Thomme: Vergleich des Abkühlungspotenzials urbaner Begrünung anhand eines simplen Fassadenmodells.

FRANCK, Ole: Komplementarität der Windenergieressource in Europa.

GABELE, Lea Maria: Vergleich der sommerlichen Kohlenstoffbilanz eines dürrgeschädigten Kiefernwaldes mit einer Neuaufforstung am selben Standort.

GERHARDS, Sebastian: Vergleich der Ener-

giebilanz eines trockengeschädigten Kiefernwaldes mit einer Neuanpflanzung am selben Standort im Sommer 2021.

HOFMAN, Léon: Analysis of differences in radiation levels between urban and rural areas around Berlin.

KALTENBACH, Janine: Einfach umsetzbare und effektive Hitzeschutzmaßnahmen in Städten der gemäßigten Breiten.

KOBJALCO, Darja: Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Arktis.

MAIWALD, Lars: Einfluss meteorologischer Faktoren auf die städtische Luftqualität und auf die innerstädtische Variabilität am Beispiel Zürich und Basel.

MEIER, Katharina: Analyse der raumzeitlichen Variabilität modellierter Spitzenwindgeschwindigkeiten über Wäldern Europas.

NICKL, Julius: Vergleichende Analyse der Längenausdehnung von Waldkiefern im Zugversuch und unter Windlast mittels Dehnmessstreifen.

RÖSEN, Carina: Der Einfluss von Wetter auf die Leistung von Marathonläufer am Beispiel von Boston und Doha.

SCHLABS, Caroline Milena: Vergleich von Local Climate Zones, Urban Atlas und CORINE in Bezug auf meteorologische Verhältnisse in Freiburg.

THOMÉ, Maurice: Einschätzung und Vergleich des meteorologischen Potenzials kurzweiliger Strahlung für diverse europäische Länder anhand Daten von EUMETSAT's CM SAF.

Masterarbeiten

LIN, Chia Yu: Coexistence and Conflict between Offshore Wind and Fisheries in Taiwan.

LUDWIG, Svenja: Evaluation of a Generalized Additive Model for the Transferability to Another City to Quantitatively Assess the Spatial Structure of Its Urban Heat Island.

PREISER, Jooris: Drought and air temperature impacts on wheat yields in Europe under two climate change scenarios.

STEPHAN, Vincent: Evaluation of the technical Wind-to-Hydrogen potential in Germany in 2030: A spatio-temporal assessment.

WEHRLE, Jonas: Quantifying the Effects of Trees on an urban Wind Field using large-Eddy Simulations.

Universität Göttingen

Bachelorarbeiten

- BIRK, Nils: Evaluierung von Methoden zur Schließung von Datenlücken in automatischen Bodenrespirationmessungen.
 FRANKE, Leon: Analysis of photosynthetically active radiation below and above canopy at Hainich national park.
 KOCH, Julius: Analyse der Wassernutzungseffizienz von zwei unterschiedlich bewirtschafteten Waldökosystemen.
 MJEMA, Ezekiel E.: The exchange of CO₂, water and energy between forest ecosystems and the atmosphere – A comparison of eddy covariance systems in Hainich National Park, Germany.

Masterarbeit

- LAGASSE, Cheyenne Water use efficiency variations and its adaptation across different Northern and Southern European regions.

Universität Graz

Bachelorarbeiten

- ARTELSMAIR, Jasmin: Aktueller Forschungsstand zu Kippelementen im Klimasystem und deren Risikoabschätzung.
 BRUNNER, Daniel: Der anthropogene Klimawandel und dessen Auswirkungen auf Österreich.
 FREYTAG, Clarissa: Starkniederschlagsereignisse im Sommer – Ursachen für Hochwasserkatastrophen am Beispiel jener im Jahr 2021 in Deutschland.
 GRUBER, Lisa: Impacts of AMOC changes on the European Climate.
 HOHENSINNER, Gabriel: Berechenbarkeit atmosphärischer Phänomene am Beispiel aktiniformer Wolken und der Morning Glory Cloud.
 HÜTTER, Jakob: Temperature change from the Earth's surface to the atmosphere.
 KÖHLER, Holger: Extremniederschläge und Wertertypen in Klimamodellen.
 KRONDORFER, Paul: Gleitschneelawinen im Klimawandel – eine Analyse am Beispiel der Hohen Veitsch.
 LAMBERT, David Benjamin: Wie der Regen in die Atacama-Wüste kommt: El Nino und der Invierno Boliviano.
 MAYER, Simon: Vulkanausbrüche und ihr Einfluss auf das Klima.
 NEBEL, Andreas: Windgeschwindigkeit an der Station Graz Universität – Wird es windiger?

- SCHAUPP, Lukas: Blitze.
 SCHMÖLZER, Felix: Mit erneuerbaren Energien zur Klimaneutralität?
 SPÖRK, Carina: Erste Analysen mit dem Niederschlagsradar Graz-Vorklinik.
 UNEG, Johannes: Wärmespeicher Ozeane.
 WEDENIG, Andreas: Klimatische Auswirkungen von Vulkanausbrüchen – Die Eruption des Samalas 1257 und die Kleine Eiszeit.
 WERNER, Yvo: Atmospheric Rivers – The physical principles governing formation, observation and landfall.

Masterarbeiten

- BARDEL, Franziska: Heavy Precipitation at the Meteorological Station Graz-University.
 HOFMANN, Tobias: A Comparison of Tracking Cut-Off Lows in the Geopotential and Relative Vorticity Field.
 KRAML, Erik: Subdaily Temperature Observations by the Rospini Family – published in Newspapers in Graz from 1780 to 1850.
 LÜPS, Severin: Quality improvement of WegenerNet precipitation data and comparative analysis of precipitation extremes.
 STRAUSS, Benjamin Alexander: Klimaveränderungen der vergangenen Jahrzehnte am Beispiel einer Auswertung von Messdaten des Klagenfurter Beckens.
 THALASSINOS, Georgios: Tracking global warming based on Earth energy uptake and energy imbalance modeling.

Dissertationen

- HOHMANN, Clara: Sensitivity and uncertainty analysis of hydro-climatic changes in south-east Alpine foreland catchments.
 WILHELMSSEN, Hallgeir: Diagnostics of tropospheric and stratospheric variability from radio occultation observations.

Universität Hamburg

Bachelorarbeit

- BÖMEKE, Janina: Statistische Auswertung des Effekts eines Standortwechsels auf eine Eddy-Kovarianz-Messung von Methanflüssen in der sibirischen Tundra.

Masterarbeiten

- ANDREOZZI, Paolo: Properties of Kelvin wave forecast errors in the ECMWF deterministic forecasts.
 HERZ, Felix: A teleconnection-based subseasonal prediction approach of wintertime cold air outbreaks in Central Europe.

- JUNG, Verena: On scale interactions and climate change in a Lorenz-2005 model.
 RAPPAT, Berinike: Variabilität der Windgeschwindigkeit in einem regionalen Klimamodell und SODAR – Beobachtungen über einen 10-Jahres-Zeitraum.
 SEIBERT, Constanze: Using moon observations to characterize infrared sounders on different satellites.
 STANKOVIC, Milica: Raumzeitliche Merkmale der sommerlichen städtischen Wärmeinsel während FESST@HH.
 WEDEMANN, Ralf: Der Einfluss verminderter Luftfahrt-Emissionen während der Covid-19-Pandemie im Frühjahr 2020 auf die Luftqualität in der Umgebung von Flughäfen.
 WEISS, Tobias: Dunkelflauten in Norddeutschland – eine meteorologische Analyse.
 WILL, Benjamin: Abhängigkeit der Divergenzmessungen von der räumlichen Stichprobenverteilung und des Flugweges.

Dissertationen

- BADEKE, Ronny: Small-scale modeling of dispersion and chemistry of ship plumes in urban areas.
 KIRSCH, Bastian: Illuminating convective cold pools with a dense station network.
 PRANGE, Marc: Elevated moist layers - exploring a blindspot in the global satellite observing system.

Universität Hannover

Bachelorarbeiten

- BITTNER, Anna Maria: Auswertung und Analyse von Nebeltagen und ihre Auswirkungen auf den militärischen Flugbetrieb der Bundeswehr.
 BOETTCHER, Nikolas: Statistische Analyse der zeitlichen Variabilität des „Cloud Enhancement“ Effekts in Hannover.
 HEINEMANN, Kendra: Vergleich der Erythemgewichteten Bestrahlungsstärke mit Personendosimetern, einem Array-Spektラルradiometer und einem Strahlungstransfermodell.
 HOTTENROTT, Philipp: Abschätzung der thermischen Adaptionszeit von Menschen bei wechselnden meteorologischen Umgebungsbedingungen.
 RAPMUND, Anja: UV-Index-Vergleich zwischen Personendosimeter, UVSPEC-Modell und UV-BTS an verschiedenen Tagen.
 SCHELLHORN, Maximilian: Bestimmung

- der Langzeitstabilität des advanced multidirectional Spectrometer (AMUDIS).
- SCHMIDT, Martin: Optimierung des Turbulenz-Recycling-Verfahrens in LES-Modellen für Windpark Anwendungen.
- SCHREIBER, Karen: Change in Cloud Coverage derived by Hemispheric Sky Images at Hannover-Herrenhausen from 2009 to 2020.
- SCHULTZ, Jana: Ableitung der Krümmenfeuchte von Böden mit Hilfe von thermischen Bodeneigenschaften, bestimmt durch abbildende IR Methoden und abbildende hyperspektrale Reflexionspektroskopie.
- STENZEL, Sarah: Über die Bestimmung des Deckungsgrades bei tiefstehender Sonne.
- WARTENBERG, Laura: Einfluss der Anpassungsmaßnahmen zur Verbesserung des Stadtklimas.

Masterarbeiten

- KALLA, Juliane: Entwicklung einer Korrekturmethode für die Ozonermittlung bei bewölkten Situationen.
- KLAMT, Janis: Quantification of dust transport by dust devils – A LES study.
- PATEL, Nishaben: Estimation and Validation of Global Horizontal Irradiance Derived from Satellite Measurements.
- WAGNER, Felix: High-Resolution Simulations of Wind Field Quantities Relevant for Urban Air Mobility Systems.
- ZARZYCKI, Karol Janusz: Untersuchung von Fluglärm ausbreitung, dargestellt am Beispiel eines regionalen Verkehrslandeplatzes.

Dissertation

- KOPATSCH, Anton: Simulation der solaren Globalstrahlung im Spektralbereich 280-800 nm für die Umweltforschung.

Universität Hohenheim

Masterarbeiten

- ALMEYRA DIAZ, Paula: Energy and CO₂-Analysis at a chemical company Process optimization of additives production processes for the reduction of Green House Gas emissions.
- HORKÝ, Dominik: Detection and preservation of Raman biosignatures in natural and artificial Mars analogue samples.
- LÖRCH, Daniel: The Impact of UV-Visible Light on Molecular Biosignatures.
- LUDWIG, Svenja: Evaluation of a Generalized Additive Model for the Transfera-

- bility to Another City to Quantitatively Assess the Spatial Structure of Ist Urban Heat Island.
- MARIMUTHU, Dinesh: Remote analysis of miscanthus growth and health to estimate physical characteristics.
- PELSER, Tristan Christopher: Benchmarking CMIP6 Earth System Models using MESMER-M climate emulator trained on observational data.
- SAUER, Lilli: The cost of being environmentally friendly – An examination of current waste management practices, their problems and possible solutions.
- WANNEMACHER, Melissa Maria: The Influence of Different Light Spectra on the Morphology and Yield Structure of Cannabis sativa L.
- WILHELM, Lena: Meteorological conditions for strongly warming contrails and the statistics of contrail's instantaneous radiative forcing.

Dissertation

- THUNDATHIL, Rohith Muraleedharan: Convective-Scale Data Assimilation of Thermodynamic Lidar Data into the Weather Research and Forecasting Model.

Universität Innsbruck

Bachelorarbeiten

- DEMETZ, Matthias: Tagesgänge meteorologischer Parameter im Inntal unter verschiedenen Bewölkungsklassen.
- ERNST, Jakob: Einfluss der Temperaturschichtung auf das Windprofil in der Grenzschicht.
- GRATZL, Daniel: Analyse von Ozonmessungen in Innsbruck: Filterung eines Datensatzes und Analyse des Wochenendeffekts.
- JEHLE, Lukas: Analyse des Wetters im Rio Santa Tal: Auswertung der Wetterstation Llupa und Datenvergleich mit dem WRF-Modell.
- KNABE, Dominik: Sekundäre Partikelbildung in der Arktis.
- REPPERT, Valerie: Recommendation of usage of CO₂ data and their spatial variability recorded in the i-Box.
- SILBERNAGL, Johanna: Das Methanbudget und die anthropogenen fossilen Quellen von Methan.
- STAUDINGER, Ilga: Bestimmung der Messgüte neuer Temperatursensoren der Innsbrucker Kommunalbetriebe für städtisches Umweltmonitoring.

- WALCHHOFER, Peter: Validierung von HATPRO Temperaturprofilen mithilfe von Radiosondendaten.

Masterarbeiten

- ALBRECHT, Peter: Past climate change in the Rio Santa Basin, Peruvian Andes, as described by multiple datasets.
- CAMPOSTRINI, Stefano: Precipitation Nowcasting: a Deep Learning Approach.
- GÄCHTER, David: New Particle Formation in Innsbruck March to May 2019.
- GROGGER, Herwig: Simulation of Deep Gravity Wave Propagation Using EULAG.
- HOFMANN, Marie: Future changes of Alpine snowfall and snowcover in a high resolution climate simulation.
- HOHLNEICHER, Martin: Evolution and structure of lee waves and rotors over the northern foreland of the Tatra Mountains.
- HOLMGREN, Erik: 21st century glacier runoff and how it buffers drought in 75 large-scale basins.
- MEDVEDOVA, Alzbeta: Future Projections of Extreme Sub-Hourly Precipitation over Europe in Kilometer-Scale Simulations.
- PFEIFFENBERGER, Michael: Reconstruction of local climate conditions during the last years and decades at the site where Ötzi's body was found.
- POSE, Willi: Raman-Mikroskopie an atmosphärischer, heterogener Eisbildung im Immersionsmodus.
- RAUCHÖCKER, Andreas: Characteristics of a cold air pool near Seefeld, Austria: Numerical modeling results.
- RUDOLPH, Alexander: Cold air pools in Seefeld.
- UDINA, Benjamin: Influence of moisture source and transport on deuterium excess of fresh snow samples at Neumayer Station, Antarctica.
- VIEHHAUSER, Roman: The Role of Fronts and Troughs to Triggering Thunderstorms in Europe during the Transitional Season.
- WÖCKINGER, Simon: Evaluation of COSMO-CLM high-resolution climate simulations over the Rio Santa basin, Peru, with focus on precipitation process.
- ZINK, Josef: Spatially Distributed Wind Measurements in the Atmospheric Boundary Layer with a Fleet of Quadrotors.

Dissertation

- HAID, Maren: Foehn-cold pool interaction in the Inn valley: a study of meso- and microscale processes observed during the PIANO field campaign.

Karlsruher Institut für Technologie

Bachelorarbeiten

- DÜRLICH, Viktoria: Secondary Ice Production in idealized Deep Convective Clouds.
 LANGE, Marie: Effects of systematic sea surface temperature biases on the representation of warm conveyor belts.
 UNSER, Tabea: Derving Haboob Properties from Convection-Permitting Simulations.

Masterarbeiten

- BERGMANN, Sören: Investigation of Drop Size Distributions recorded by a Network of Disdrometers during the Swabian MOSES Campaign 2021.
 MOCKERT, Fabian: Predicting the forecast skill for the European region with the use of machine learning models.
 NGUYEN, Uyen: Application of the EM27/Sun FTIR spectrometer for open-path Measurements of carbon dioxide.
 SIEGMANN, Fabian: Spatial and temporal variability of low-level convergence zones triggering deep moist convection in south-western Germany.

Dissertationen

- ALBERTI, Carlos: Ground based FTIR and MAX-DOAS observations of greenhouse and trace gas emissions in the Rhine valley (Germany), St. Petersburg and Yekaterinburg (Russia).
 BRAUN, Christoph: Waterbelt scenario for the Cryogenian glaciations questioned by uncertain mixed-phase clouds.
 GAO, Linyu: Temperature dependence of the molecular composition and volatility of secondary organic aerosol.
 MUSER, Lukas Ole: Combining Aerosol Aging and Data Assimilation for Improving Volcanic Aerosol Forecast.
 PICKL, Moritz: Perspectives on warm conveyor belts- sensitivities to ensemble configuration and the role for forecast error.
 SCHARUN, Christian: Quantifying and modeling methane emissions from the North Sea region with ICON-ART.
 SONG, Junwei: Online Chemical Characterization of Volatile Organic Compounds and Aerosol Particles at Urban and Rural Locations.
 VOGEL, Franziska: Short-term Variation in Measurements of Atmospheric Ice-Nucleating Particle Concentrations.
 WANDEL, Jan Lucas: Representation of warm conveyor belts in sub-seasonal forecast models and the link to Atlantic-European weather regimes.

- WEGNER, Daniel: Imaging simulation of atmospheric turbulence based on phase screen methods.
 WILHELM, Jannik: Einfluss atmosphärischer Umgebungsbedingungen auf den Lebenszyklus konvektiver Zellen in der Echtzeit-Vorhersage.

Universität Kiel

Bachelorarbeiten

- DETJEN, Laura: Statistical Analysis of Climate Variability in the Nordic Seas.
 GARDEN, Pia Undine: Southern Hemisphere sudden stratospheric warmings in the ECHAM6 model.
 HOCKE, Nana: Representation of jet stream trends in atmosphere models.
 KANZLER, Leah: How do atmosphere models reproduce extreme precipitation events?
 KAUFMANN, Daniel: Veränderung des Schneefalls über Europa in Klimamodell-simulationen.

Masterarbeit

- BIELKE, Inken: Relationship between Sea Surface Temperature and Surface Heat Fluxes over the North Atlantic.

Universität Köln

Bachelorarbeiten

- KRAUSE, Sibylle Maria: Tagesgang der Temperatur und des Wasserdampfes in Ny-Ålesund.
 RAABE, Nina: Evaluation einer Wolkenparametrisierung auf Basis der kritischen relativen Feuchte mit Hilfe von Large-Ed-dy-Simulationen.

Masterarbeiten

- ELBLE, Thomas: Simulation of paleolithic human dispersion and birth-death dynamics using a constrained random walk model.
 GORDEEV, Egor: Evaluation of Machine Learning algorithm for cloud fraction parameterization using high-resolution data – ICON-LES.
 MARROLLO, Giancarlo: Comparing Signatures of Riming in Radar Observations and McSnow Simulations.
 WEDEMEYER, Christian Hartmut: Simultaneous occurrence of NAO events and wave guides in summer months.

Dissertation

- TERZI, Leonie Jana von: Investigating Ice microphysical processes by combining multi-frequency and polarimetric Doppler radar observations with Lagrangian Monte-Carlo particle modelling.

HS Bund im FB Wetterdienst Langen

Diplomarbeiten

- STÖHR, Johanna: Der meteorologische Einfluss auf den Verlauf der Wassertemperatur der Flensburger Innenförde.
 ZEISKE, Pauline: Untersuchung nächtlicher Lokalwinde im Raum Köln und Leverkusen aus MUKLIMO_3 Simulationen für sommerliche Hochdruckwetterlagen.

Universität Leipzig

Bachelorarbeiten

- BAUMER, Finja: Comparison of radiosonde data from Leipzig to meteorological profiles of two atmospheric models.
 BERGHALD, Sebastian: Evaluierung des Abgleichs von Klimaprojektionsdaten für sächsische Gemeinden mit dem heutigen Klima von Städten in Südeuropa.
 BRUDER, Sina: Gibt es einen messbaren Rückgang im Auftreten tiefer Wolken?
 DAVID, Johannes: Zeitabhängige Größenverteilung von Wolkenröpfchen aus geostationären Satellitenbeobachtungen.
 ECKERMANN, Oliver: Schneefall im nordostdeutschen Tiefland an ausgewählten Messstationen und in globalen sowie regionalen Klimamodellen.
 GUNDLACH, Josephiene: Temperaturempfindlichkeit biogener und arktischer Eiskeime.
 HECKMANN, Valentin: Ableitung von Oberflächenparametern aus dem Grenzschichtwindprofil über Leipzig.
 KUNZE, Pascal: Klimatische Einordnung der meteorologischen Bedingungen ausgewählter Flüge während der CIRRUS-HL Kampagne.
 ÖHLERT, Maurice: On the reliability of large ensembles simulating the stratospheric polar vortex.
 POMNITZ, Nelly: Einfluss der subgitterskaligen Vertikalgeschwindigkeit auf den effektiven Strahlungsantrieb durch Aerosol-Strahlungs- und Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen im ICON-HAM Aerosol-Atmosphärenmodell.

- SCHMIDT, Judith: Bestimmung von Bedeckungsgrad und Wolkentyp mit Himmelskammerbeobachtungen und Vergleich mit schiffsgebundenen synoptischen Beobachtungen.
- WALPER, Nils: Characterization of Tradeclouds by Remote Sensing Methods.
- MONRAD-KROHN, Lukas: Analysing the Variability of Dropsonde Profiles of four Arctic Airborne Campaigns in the Vicinity of Svalbard.
- TROSITS, Anna: A Statistical Analysis of the Hydrometeorclassification by the Thies Laser Precipitation Monitor.
- WIELTSCH, Julia: Analysis of atmospheric rivers during the DACAPO-PESO field campaign in Punta Arenas, Chile.

Masterarbeiten

- ADLER, Anja: Ableitung von Profilen der Schneekorngröße einer Schneewand aus Messungen mit einem abbildenden Spektrometer.
- ENGELHARDT, Richard: Precipitation-based methods for absolute cloud radar calibration.
- KÖTSCHKE, Anton: Investigating precipitation evaporation in the trade wind zone using EUREC4A data.
- KRAULICH, Florian: Role of atmospheric and oceanic processes in Arctic amplification: Sensitivity to climate engineering.
- MÜLLER, Jason: Global Adjustments and Circulation Responses to Smoke Aerosol Forcing from Australian Wildfires.
- RITTER, Oscar: Characterisation of the properties of trade wind cumulus clouds with Sentinel-2 observations, including cloud cover, cloud height, cloud size distribution and their radiative effects.
- ROSENBERG, Sophie: Melt Pond Depth Retrieval applying Airborne Hyperspectral Imagery and the Potential of a New RGB Band Approach.
- SCHAEFER, Jonas: Investigation of stratospheric ice nucleating particle concentrations for background conditions and in a biomass burning plume.
- SEIDEL, Clara: Analysis of water vapour mixing ratio profiles in the Arctic from Raman lidar measurements during the MOSAiC-campaign.
- optical aerosol properties with in-situ and remote-sensing techniques.
- FLOUTSI, Athina Avgousta: Development and application of an automatic lidar-based aerosol typing algorithm.
- GRIESCHKE, Hannes Jascha: Arctic low-level mixed-phase clouds and their complex interactions with aerosol and radiation Evaluation of Machine Learning algorithm for cloud fraction parameterization using high-resolution data – Remote sensing of the Arctic troposphere with the shipborne supersite OCEANET-Atmosphere.
- HERTEL, Daniel: Optimierung von urbanen Hitzeanpassungsmaßnahmen.
- RADENZ, Martin: Hemispheric contrasts of ice formation in stratiform supercooled liquid clouds: Long-term observations with the ground-based remote-sensing supersite LACROS.
- SCHIMMEL, Willi: Identifying Cloud Droplets Beyond Lidar Attenuation from Vertically Pointing Cloud Radar Observations Using Artificial Neural Networks.
- STAPF, Johannes: Influence of Surface and Atmospheric Thermodynamic Properties on the Cloud Radiative Forcing and Radiative Energy Budget in the Arctic.
- WITTHUHN, Jonas: Aerosol – remote sensing, characterization and aerosol-radiation interaction.
- VELASCO, Carola Barrientos: Radiative Effects of Clouds in the Arctic.

Universität Mainz

Bachelorarbeiten

- ARNDT, Andreas: Eine Windkanalstudie zur Bestimmung des Retentionskoeffizienten von Pinosäure an bereifenden Graupeln unter trockenen Wachstumsbedingungen.
- DAMMERMANN, Lena: The Relationship between Wave Activity and Zonal Wind - Linear Regression Analysis.
- GÖLZ, Lorenz: Rossbywellenpakete mit unterschiedlicher Vorhersagegüte: Composite-Analyse.
- GÖMMER, Laura: Eine Windkanalstudie zur Bestimmung der Retentionskoeffizienten von Pinosäure während der Bereifung im Nasswachstum.
- HEY, (Franz) Moritz: Experimentelles Bestimmen der Verteilungskoeffizienten wässriger Malonsäurelösungen.
- HÜBSCH, Luisa: Stratosphärischer Einfluss auf die Troposphäre: Untersuchungen mit Hilfe einer zeitlich gefilterten PV

- Tendenzgleichung.
- METZNER, Lena: Einfluss von meteorologischen Modelldaten auf die Analyse von flugzeuggetragenen Beobachtungen.
- SCHITTHOF, Jana: Temperaturverteilung und Strahlstrom über Eurasien und Europa.
- SOPHIA, Merle: Visualization of Rossby wave packets during recent heat waves over Eurasia.

Masterarbeiten

- BERGNER, Hannah: Synchronisation in ice clouds.
- CHAMPION, Nicholas: Olivine with sulfuric acid coating as an analogue of stratospheric meteoric aerosol for the ERICA Laser Ablation Mass Spectrometry.
- DIETZ, Philipp: Simulation of the plume chemistry of degassing volcanoes.
- MOUJI, Navid: Analysis of biomass burning plumes encountered during the NET-CARE flight measurement campaign in 2014: Particle composition, sources, and transport pathways into the Arctic.
- RIPPERGER-LUKOSIUNAITE, Simona: Deriving Nitrogen Oxide emissions from inland waterway vessels using MAX-DOAS measurements.
- SCHALAMON, Florina: Evaluation of the AROME Arctic Model Based on Observations in Isfjorden, Svalbard.

Universität München

Bachelorarbeiten

- BAUER, Paul: The Role of Ural Blockings in Stratosphere-Troposphere Coupling Based on Extended-Range Ensemble Forecasts.
- DÖMER, Klara: An Analysis of the Energy Budget of Observed Baroclinic-Wave Life-Cycles.
- ECKERT, Majbritt: Quantitative Explanation of the Temperature Increase due to Absorption by Carbon Dioxide in a Demonstration Experiment.
- FELGER, Paul: The Impact of the PSP2 Scheme on Humidity in the Boundary Layer During Non-Rainy Conditions.
- KAMPE, Dominik: Building a Linear Feedback Model of the “Annular Mode” Using ICON-Model Runs.
- MÄHNERT, Marie: Bestimmung und Vorhersage der solaren Einstrahlungsvariabilität durch Wolkenbilder und maschinellem Lernen.
- STOCKBAUER, Simon: Variability and Trends of the Net Diabatic Term and its

Connection to the Stratospheric Overturning Circulation.

Masterarbeiten

BARDACHOVA, Tatsjana: Tropical Waves and Predictability in Simulations with a Stochastic Convection Scheme.
 DURAN, Cansu: Machine Learning for Rain Prediction.
 FUENTES, Conrat, Pablo: Aspects of Jet Regimes in a Dry Dynamical Core Model.
 GINDL, Stephan: Development of a neutral network based forward operator for aerosol-affected satellite radiances.
 HENNING, Manuel: Traffic Emission Apportionment of NO₂ and CO₂ using Imaging Cloudglint.
 HOFER, Sina: Vermeidung von Kondensstreifen – Ein erster Versuch in der Praxis.
 HUFNAGL, Leonhard: Der Einfluss von Ozonänderungen auf die stratosphärische Dynamik in 4xCO₂-Klimasimulationen.
 KOSTENBADER, Tobias: Cloud Statistics in an State of Convective Self-Aggregation.
 MEIER, Sophie: Optimization of the Wavelength Grid for Rapid Calculation of Solar and Thermal Irradiances and Heating Rates.
 MUJKANOVIC, Max: Ein Schneller Ansatz um virtuelle Kamera Bilder mit vorausgerechneten Strahldichte-Feldern zu berechnen.
 SACKRENZ, Christian: Aspects of Planetary Waves in the Austral Winter Stratosphere.
 WALDMANN, Paul: Development and First Deployment of an Innovative Airborne 13C(CH₄) In Situ Measurement Setup.
 WEBER, Anna: Fernerkundung der Orientierung von Eiskristallen mittels polarimetrischer Beobachtungen des Cloudglints.

Dissertationen

HOCHSTAFFL, Philipp: Trace gas concentration retrieval from short-wave infrared nadir sounding spaceborne spectrometers.
 HUMMEL, Timon Fabian: Modelling and validation of slit-homogenizers in space-based imaging spectrometers.
 PIONTEK, Dennis: A novel machine learning-based satellite retrieval of volcanic ash for Meteosat covering the petrological variability.
 REICHERT, Robert Jaroslav: Characterization of Gravity Waves in the Lee of the Southern Andes utilizing an Autonomous Rayleigh Lidar System.
 TETONI, Eleni: Synergy of multi-wavelength radar observations with polarimetry to retrieve ice cloud micorphysics.

VERMA, Pooja: Simulating contrail formation within cirrus in the high-resolution ICON-LEM model.

WALZ, Roland: Dynamical coupling of the stratosphere and troposphere in a changing climate.

Technische Universität München

Bachelorarbeit

PLANNER, Anna-Maria: Comparison of phenological development of climax and pioneer species under two different chilling and forcing treatments.

Masterarbeiten

BALLING, Anna: Allergenicity of Airborne Pollen: Air Quality and Meteorology-Related Changes and the Role of Pollen Origin Using HYSPLIT Clusters. A Retrospective Data Analysis of Two Sites in Southern Germany.
 BIGALKE, Carina: Assessment of weather influence on daily winter tourism in the Bavarian Alps.
 EICHELSBACHER, Sebastian: Combining field-level data, climate, and remote sensing data to understand management – environment interactions in winter wheat production.
 LEMKE, Carina-Denise: Homogenisierung meteorologischer Daten im alpinen Bereich. Eine vergleichende Analyse der monatlichen Temperatur- und Niederschlagswerte am Beispiel der Zugspitze.
 SCHWEIGER, Matthäus: Standortabhängige phänologische Entwicklung von heimischen Baumarten in Abhängigkeit des Mikroklimas.
 SCHWINDL, Michael: Investigating the frost risk of tree species with different life strategies and phenological stages using a simulated late frost event.

Dissertation

SEIDEL, Hannes: Intraspecific variation in the response of Scots Pine (*Pinus sylvestris*) seedlings to multiple warmer drought periods.

Universität Trier

Keine Meldungen

Universität Wien

Bachelorarbeiten

AUER, Natalie: Wolkenstrahlungseffekte in einer Schnellballeerde-Simulation.
 GERWINAT, Johannes: Source Regions of Ambrosia Pollen in the Alps identified.
 HALAMA, Heinrich: Extreme bodennahe, vertikale Temperaturgradienten und Auflösung von Kaltluftseen am Beispiel Trafelberg.
 GAROFALO, Livio: Untersuchung der Veränderung der Starkregendauer in Österreich von 1993 - 2019.
 PÜSCHEL, Benjamin: Klassifizierung von Modellbewölkung in einer 1,000-Member Ensemble Simulation.
 UNTERBERGER, Jakob: Evaluation of Convective Indices over the Alpine Area.
 WINTERER, Isabella: Der Einfluss der Nordatlantik-Oszillation auf das Wetter in Österreich.

Masterarbeiten

AUTHRIED, Sophie Marie: Investigation of effects of poroelasticity on seismic wave speed in Argostoli, Greece.
 BUTZ, Klara Kornelia: Studying the cloud-radiative impact on extratropical cyclones through baroclinic life cycle simulations.
 FALTL, Gloria: The contribution of ozone depleting substances to climate forcing at selected latitude bands.
 FRITZ, Magdalena: Assessment of Oceanic Transports in the Indonesian Through-flow region as represented by Ocean Reanalyses.
 HUBER, Manuel: Atmospheric and surface pathways of cloud-radiative impact on circulation response to warming.
 HUTTER, Valentina: Probabilistic observation pre-processing for ensemble-based data assimilation.
 LÖFFELMANN, Jana: Investigating Stratospheric Climate Variations following Volcanic Eruptions in the 1950s and 1960s.
 MADJDI, Nikta: Objective derivation of climate indices for the assessment of catchment area sensitive contributions to flood events alongside the Danube.
 ROSENBERGER, Markus: Assessment of temperature trends of atmospheric seasonal forecasts of the 20th century.
 SOTO BRAVO, Francisca: The nuclear magnetic resonance investigation of pore coupling effects in near-surface environments.
 WEISSINGER, Maximilian: Improvement of air traffic management through prob-

abilistic thunderstorm forecasts at Schwen-
 chat Airport.

Dissertationen

- LÖBERICH, Eric: Constraints on the origin
 of anisotropy in the upper mantle.
 NOVOSELOV, Artemii: ThunderSeis: Seis-
 mic analysis of thunder signals.

Universität Würzburg

Bachelorarbeit

- STOCKER, Luna: Missing acceleration –
 Analyse der mittleren Meeresspiegelzeit-
 reihe Cuxhaven im globalen Kontext mit
 besonderem Fokus auf der lokal nicht de-
 tektierbaren Beschleunigung, 1900-2021.

Dissertationen

- ABEL, Daniel: Weiterentwicklung der Boden-
 hydrologie des regionalen Klimamodells
 REMO.
 IBEBUCHI, Chibuiki: Bias correction of
 climate model output for Germany.

Fachhochschule Zürich

Bachelorarbeiten

- MING, Stefan Robert; SCHREIBER, Jakob:
 DEICE2: Drohnen-Flugversuche für ein
 flüssigkeitsbasiertes Anti-Icing System.
 WIRTH, Roland: Weiterentwicklung eines
 Frameworks für die drohnenbasierte
 Aufnahme von Photogrammetrie-Daten
 für Turbulenzmodellierung (Drone to
 sim: DTS).
 ZURBRÜGG, Niculin; TSCHANNEN, Tim:
 3D-SigWX: Weiterentwicklung einer
 Machbarkeitsstudie für eine neue Visuali-
 sierungsmethode von LL-SIGWX-Daten.

Diplomarbeiten

- BARDH, Nicolas; LICHTENSTEIGER, Mau-
 rin: Heatbell – Developing a drone based
 vertical air temperature measurement
 concept within the urban heat island of
 Winterthur.
 FRITZ, Jan: Bau und Validierung einer Mess-
 geräte-Halterung für Partikelmessungen
 mit der DJI Matrice 300 RTK Drohne.
 HITZ, Severin Marice: Urban Heat Routes:
 Klimatologische und verkehrliche Analyse
 von hybriden Fahrstreifen.
 JANSEN, Martin: Vergleich von meteorolo-
 gischen Prognosedaten mit gemessenen
 Flugprofilen.

Universität Zürich

Dissertationen

- CASSELMAN, Jake W.: The Role of the
 Tropical Atlantic for the El Niño Southern
 Oscillation Teleconnection to the North
 Atlantic/ European Region.
 CHEN, Gang: Investigation of Organic Aero-
 sol Sources across Europe Using Novel
 Source Apportionment Techniques.
 DAHINDEN, Fabienne: Tropospheric moistu-
 re transport pathways and stable water iso-
 topes over the subtropical North Atlantic.
 DOYENNEL, Arseni: Study of the past and
 future evolution of the ozone layer.
 GESSNER, Claudia: Physical storylines for
 very rare climate extremes.
 HEIM, Christoph Edgar: Simulation of Tropi-
 cal Marine Clouds in Kilometer-Reso-
 lution Atmospheric Models.
 ISENRICH, Florin: Development and Ap-
 plications of Fluoropolymer-based Mi-
 crofluidic Platforms for Glycobiology
 and Atmospheric Chemistry.
 KATHAROPOULOS, Ioannis: Advances in
 Inverse Modelling for the Estimation of
 Greenhouse Gas emissions.
 KLUMPP, Kristian: Heterogeneous ice nu-
 cleation induced by mineral dust particles:
 The influence of (bio-)organic substances
 and particle morphology.
 MOALLEMI, Alireza: Theoretical assess-
 ment, laboratory development, and field
 application of in situ aerosol characte-
 rization techniques based on ultra violet
 light induced fluorescence and multi-angle
 aerosol polarimetry.
 MÜLLER, Marcel: Investigating the influence
 of oxidant concentration in fatty acid aero-
 sol ozonolysis by means of electrodynamic
 balance-mass spectrometry.
 PASQUIER, Julie: Towards solving the puzzle
 of ice crystal formation and growth in
 Arctic mixed phase clouds.
 POLTERA, Yann Etienne: Performance
 assessment and improved processing of
 balloon-borne chilled mirror and thin-film
 hygrometers.
 UBBIALI, Stefano: A Comprehensive Ap-
 proach to Process Coupling in Atmo-
 spheric Models: Theory, Software, and
 Applications.
 VILLIGER, Leonie: Large-scale circulation
 drivers and stable water isotope characte-
 ristics of shallow clouds over the tropical
 North Atlantic.
 WIEDER, Jörg: Ice formation in remote re-
 gions: From nucleation to multiplication.

Nachträge für das Jahr 2021

Universität Dresden

Bachelorarbeit

- MÜLLER, Lena: Die Zukunft konvektiver
 Zellen vor dem Hintergrund des Klima-
 wandels.

Masterarbeiten

- APOLLO, Florence B.: Microclimatic as-
 sessment of thermal-niche properties in
 Montane meadows located in the Ore
 mountains.
 ASCHERI, Mary Esther: Laser-sintering
 process model development of silver-
 paste targeting an alternative leaf wetness
 sensor design and assessment of a sensor
 prototype.
 AGUILAR CANDANEDO, Ana Luisa: Sta-
 tistical Downscaling for Panama's Climate
 Change Scenarios with the ERA5 reana-
 lysis using Machine Learning.
 HEINEMANN, Marie: Räumliche Analyse
 ausgewählter Einflussgrößen hinsichtlich
 Trockenheits- und Hitzevulnerabilität
 urbanen Grüns am Beispiel der Stadt
 Dresden.
 HOMOUDI, Ahmed: Objective Identification
 and Characterization of Double ITCZ in
 CMIP5 Models and its Effects on Regional
 Climate Models.
 JÜSCHKE, Lioba: Sensitivität von Stadtkli-
 masimulationen mit ENVI-met: Bewer-
 tung für verschiedene Stadtstrukturtypen
 in Dresden und Erfurt.
 KASOWOLE, Esez: Microclimate modelling
 of montane meadows in the Ore Mountains
 region: a case study.
 KUGLER, Lucas: Bewertung von Deep Lear-
 ning Modellen für die Klassifizierung
 der Landbedeckung unter Verwendung
 historischer CORONA-Satellitenbildern.
 MAUL, Lisa: Analyse und Bewertung von
 Tools zur Abbildung von hitzeresilien-
 ten Klimaanpassungsmaßnahmen auf
 Quartiersebene.
 MOYZES, Michelle Desirée: Entwicklung
 eines Indikators zur Bewertung der
 Ökosystemleistung „Klimaregulation“
 in Städten.
 NEUMANN, Marie: Auswirkung des Maß-
 nahmenkonzeptes Natur und Landschaft
 auf das Mikroklima der Stadt Coswig.
 TIEDTKE, Caroline: Transpiration eines
 Mitteldeutschen Buchenwaldes.
 SANTANDREU VICENS, Paula: Solving
 the puzzle in linking drought hazard

information with humanitarian data to inform early action.

Dissertation

KÖRNER, Philipp: Fog and fog deposition: A novel approach to estimate the occurrence of fog and the amount of fog deposition.

Universität Trier

Bachelorarbeit

MICHELS, M.: Charakterisierung atmosphärischer Profile aus Messungen mit SODAR/RASS am Kap Baranow, Sibirien.

Universität Wien

Masterarbeit

RAUTER, Daniel: Trends und Variabilität von stratosphärischem Ozon über dem Hohen Sonnblick.

Nachträge für das Jahr 2020

Universität Dresden

Bachelorarbeiten

GOLDAMMER, Rahel: Vergleich von verschiedenen Bodenfeuchteprodukten für die Trockenjahre 2018 und 2019.

MASTEL, Marina: Räumliche Variabilität von meteorologischen Messungen mit Ultraschallanemometern über einer Wiesenfläche.

NOACK, Marie-Luise: Thermische Emissivität und Oberflächentemperatur des Gründachs im Botanischen Garten von Dresden.

PAULY, Dustin: Definition und Merkmale von Low Level Jets: Analyse von Mess- und Modelldaten im Tharandter Wald.

SÜSS, Annika: Das Mikro- und Bioklima des Großen Gartens und seine Wirkung auf die städtische Umgebung.

Masterarbeiten

SCHMELZ, Amelie: Analyse des footprints von CO₂- und Wärmeflächen und der Energiebilanzschließung auf Basis von Eddy-Kovarianz-Messungen am ICOS-Standort Tharandt.

SEIDEL, Ronny Michael: Abschätzung der Klimaeinflüsse auf das Schneebruchrisiko in Sachsen.

STOLLE, Pia: Water use, light use and carbon use efficiency of different land uses at ICOS ecosystem sites of the TU Dresden.

UIBOUPIN, Kerstin: Comparison of the thermal stress of pedestrians in different urban districts of Dresden and Erfurt based on ENVI-met simulations.

Dissertation

MOLINA RINCON, Oscar David: Influence of climate change on the water availability over eastern side of Colombia.

Nachträge für das Jahr 2019

Universität Dresden

Bachelorarbeit

GIEBEL, Franziska: Wildabfließendes Wasser: Ursachen, Folgen und Anpassungsmaßnahmen im Ortsteil Skäbchen der Gemeinde Großenhain.

Masterarbeit

QUESADA-CHACÓN, Dánnell: Statistical Downscaling of CMIP5 Projections for Costa Rica.

Kontakt

TANJA GLATZ
 Deutscher Wetterdienst
 Deutsche Meteorologische Bibliothek
 Frankfurter Straße 135
 63067 Offenbach
 tanja.glatz@dwd.de

promet Vorschau auf die nächsten Hefte

- Radarmeteorologie
- Vorhersagbarkeit
- Beobachtungssysteme und Modellierung von Treibhausgasen

