

Stadtklima in Hamburg

K. Heinke Schlünzen, Wolfgang Riecke, Benjamin Bechtel, Marita Boettcher, Saskia Buchholz, David Grawe, Peter Hoffmann, Ronny Petrik, Robert Schoetter, Kristina Trusilova, Sarah Wiesner

- 3.1 Einführung – 38**
- 3.2 Besonderheiten des Stadtklimas gegenüber dem regionalen Klima – 38**
 - 3.2.1 Erhöhte Temperaturen (UHI) – 38
 - 3.2.2 Erhöhte horizontale Heterogenität der Temperaturverteilung – 39
 - 3.2.3 Erhöhte Grenzschichten und verstärkt instabile Schichtung in der Nacht – 39
 - 3.2.4 Reduzierte Verdunstung – 39
 - 3.2.5 Reduzierte Windgeschwindigkeit und verstärkte Böigkeit – 39
 - 3.2.6 Auftreten von Flurwindssysteme und regionaler Windsysteme – 39
 - 3.2.7 Bewölkung, Sonnenscheindauer, Strahlung – 40
 - 3.2.8 Veränderte Niederschlagsverteilung – 40
 - 3.2.9 Verstärkte Luft- und Lärmbelastung – 40
- 3.3 Gegenwärtiges Stadtklima Hamburgs – 41**
 - 3.3.1 Stadteffekte auf die Temperatur – 41
 - 3.3.2 Stadteffekte auf den Wind – 43
 - 3.3.3 Stadteffekte auf den Niederschlag – 44
 - 3.3.4 Stadteffekte in der Luftqualität – 45
 - 3.3.5 Lärmbelastung in der Stadt – 45
- 3.4 Stadtklima Hamburgs bei Klimawandel – 46**
 - 3.4.1 Entwicklung der Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland – 46
 - 3.4.2 Entwicklung der Bewölkung und Niederschläge – 47
- 3.5 Einflüsse der Stadtentwicklung auf das Stadtklima (Szenarien) – 47**
 - 3.5.1 Stadtentwicklung und Temperatur – 47
 - 3.5.2 Stadtentwicklung und Niederschläge – 48
 - 3.5.3 Stadtentwicklung und Wind – 49
 - 3.5.4 Stadtentwicklung und Klimawandel – 49
- 3.6 Herausforderungen des Klimawandels und absehbarer Stadtstrukturänderungen sowie mögliche Reduktions- und Anpassungsmaßnahmen – 49**
- 3.7 Schlussbemerkungen – 50**
- Literatur – 51**

Verantwortliche, vom Lenkungsausschuss berufene Leitautoren: K. Heinke Schlünzen, Wolfgang Riecke
 Von den Leitautoren hinzugezogene Autoren: Benjamin Bechtel, Marita Boettcher, Saskia Buchholz, David Grawe,
 Peter Hoffmann, Ronny Petrik, Robert Schoetter, Kristina Trusilova, Sarah Wiesner

3.1 Einführung

Weltweit lebt jeder zweite Mensch in einer Stadt; in Deutschland leben sogar etwa 76 % der Bevölkerung in städtischen Gebieten (■ Abb. 3.1). Schätzungen der künftigen Bevölkerungsentwicklung zeigen eine noch stärker zunehmende Urbanisierung (■ Abb. 3.1) mit geschätzten 8 von 10 Bürgern, die bis zur Mitte dieses Jahrhunderts in Deutschland in einem Stadtgebiet leben werden. Die Urbanisierung ist auch in der Metropolregion Hamburg (MRH) hoch und höher als im weltweiten Durchschnitt. Von den etwa 4,3 Mio. Menschen (Metropolregion 2009) leben allein 55 % in den 20 größten Städten (mehr als 25.000 Einwohner). Daher ist es von größter Bedeutung, die Zusammenhänge von Klima und Stadtklima zu verstehen und zu analysieren, wie sich beides in Zukunft entwickeln wird.

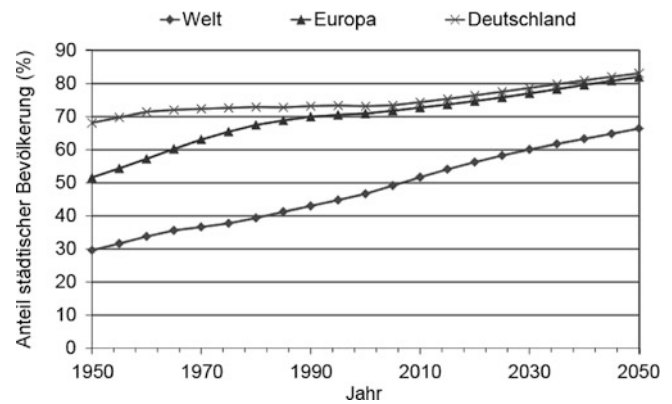
Im 1. Klimabericht für die MRH (1. HKB, von Storch und Claussen 2011) wurden Aspekte des Hamburger Stadtklimas aufgrund der damals für Hamburg vorhandenen Untersuchungen bzw. Literatur zusammengestellt. Die dort beschriebenen Wirkweisen von städtischen Siedlungsflächen bleiben grundsätzlich bestehen; in der vorliegenden Neuauflage werden einzelne Aspekte des Stadtklimas deutlich umfassender beschrieben und mit Zitaten belegt. Inzwischen liegen nicht nur detailliertere Studien zur Temperatur und erste Analysen zu Niederschlägen für den Sommer vor (► Abschn. 3.3), sondern auch zu den Folgen von Klimaänderungen (► Abschn. 3.4) und von Stadtentwicklungsmaßnahmen (► Abschn. 3.5) für das Stadtklima. Herausforderungen des Klimawandels werden in ► Abschn. 3.6 diskutiert. In den Schlussbemerkungen (► Abschn. 3.7) wird auch darauf eingegangen, welche Ergebnisse für Hamburg noch sehr unsicher sind und wo dementsprechend Forschungsbedarf besteht. ► Abschn. 3.2 befasst sich zunächst mit den Besonderheiten des Stadtklimas insgesamt.

3.2 Besonderheiten des Stadtklimas gegenüber dem regionalen Klima

Jegliche Umgestaltungen der natürlichen Oberflächen und ihrer Eigenschaften verändern lokal das Klima. In urbanen Gebieten mit ihren zahlreichen künstlichen Materialien und Formen resultiert daraus das Stadtklima. Die Modifikationen des regionalen Klimas hängen dabei entscheidend ab von der Stadtstruktur (z. B. Gebäudehöhe, Anteil der versiegelten Flächen, verwendeter Baustoff, ...) und den damit verbundenen Besonderheiten (Emissionen in die Atmosphäre, Bewässerung, ...), was zu den in diesem Abschnitt betrachteten Besonderheiten des Stadtklimas führt.

3.2.1 Erhöhte Temperaturen (UHI)

Das bekannteste Merkmal des Stadtklimas ist die städtische Wärmeinsel, welche die Temperaturdifferenz in der bodennahen Atmosphäre zwischen städtischen und ländlichen Gebieten beschreibt (Oke 1982). Aus Satellitendaten lassen sich Oberflächen-temperatur-Wärmeinseln (SUHI) ableiten (z. B. Parlow et al. 2014); dabei werden die Differenzen der Oberflächentempera-



■ Abb. 3.1 Urbanisierung weltweit, in Europa und in Deutschland. Abbildung basiert auf Daten aus UN (2012)

ren von städtischen und ländlichen Flächen betrachtet. Die SUHI sind dabei von größerer Amplitude als die Temperaturdifferenz basierend auf Messungen in der bodennahen Atmosphäre. Die SUHI bildet ihr Maximum vor allem tagsüber aus. Das Maximum der Wärmeinsel in den bodennahen Luftschichten (UHI) bildet sich hingegen vor allem in den späten Abendstunden sowie in der Nacht aus. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf diesen Typ der Wärmeinsel.

Städtische Wärmeinseln prägen sich besonders in ruhigen sommerlichen Nächten bei klarem Himmel aus (z. B. Schlünzen et al. 2010; Richter et al. 2013; Wienert et al. 2013). Die erhöhten Nachttemperaturen sind von besonderer Bedeutung, da sie die nächtliche Erholung während einer Hitzeperiode für einen Menschen erschweren. Höhere Temperaturen lassen die Sterblichkeit bei längeren heißen Sommerperioden ansteigen, wie es z. B. für London (Armstrong et al. 2011), aber auch für deutsche Städte (Heudorf und Meyer 2005; Gabriel und Endlicher 2011) gefunden wurde. So wurde z. B. für Berlin ein erhöhtes relatives Mortalitätsrisiko bei starker Wärmebelastung (gefühlte Temperaturen für 3 h über 32 °C) gefunden (Scherber 2014) sowie eine Zunahme der Morbidität bei über 64-Jährigen mit Atemwegserkrankungen, wobei hier auch sozioökonomische Faktoren eine Rolle spielen (Scherber et al. 2013). Weitere Betrachtungen der gesundheitlichen Auswirkungen sind ► Abschn. 8.2 zu entnehmen.

Die UHI ergibt sich aus Veränderungen des Oberflächenenergiehaushalts aufgrund der Stadtstruktur mit erhöhter Wärmespeicherung während des Tages und Wärmeabgabe bei Nacht, der geringeren Verdunstung, der veränderten Strahlungsbilanz und darüber hinaus aus anthropogenen Wärmeemissionen. Sie hat einen Tages- und einen Jahreszyklus, wobei die Überwärmung, wie schon erwähnt, vor allem abends und in der Nacht vorhanden ist. Die Intensität der UHI hängt von der vorherrschenden Windgeschwindigkeit und von den Bewölkungsverhältnissen ab. Bei strahlungsintensiven und windschwachen Wetterlagen ist die UHI am deutlichsten ausgeprägt. Als Schwellenwerte für eine windschwache Strahlungswetterlage werden durchweg Windgeschwindigkeiten von weniger als 3 m/s und ein Bedeckungsgrad des Himmels von weniger als 4/8 angesetzt (s. dazu auch von Storch und Claussen 2011:56). Für die Station Hamburg-Fuhlsbüttel ergibt sich eine mittlere Jahressumme für

windschwache Strahlungsnächte von 65 (Bezugszeitraum 1981–1990; Augter 1997).

Überwärmung und insbesondere Hitze bedeuten eine zusätzliche Gefahr für die Gesundheit. Die Hitzewelle 2003 verursachte etwa 70.000 zusätzliche Todesfälle in Europa, davon etwa 20–38 % infolge von zusätzlicher Luftverschmutzung (Jalkanen 2011). Da sowohl regionale Hitzewellen als auch intensive Wärmeinseln im Sommer bei stationären, antizyklonalen Wetterlagen mit Windstille (sog. autochthone Wetterlagen) zu beobachten sind, ist die städtische Überwärmung sogar von noch größerer Bedeutung in Hitzewellensituationen. Nach der Sommerperiode 2003 wurde deutlich, dass während einer Hitzewelle die zusätzlichen Temperaturerhöhungen in städtischen Gebieten zu gesundheitsgefährdenden Temperaturen führen können, auch in der MRH. Näheres zu den Wirkweisen kann dem ► Abschn. 8.2 zum Thema Gesundheit entnommen werden.

3.2.2 Erhöhte horizontale Heterogenität der Temperaturverteilung

Durch vielfältige Verschattungen, Reflexion der kurzwelligen Sonnenstrahlung, Wärmespeicherung durch Gebäude, Wärmeabstrahlung und damit verbundenem Strahlungseinfang in Straßenschluchten sowie einem erhöhten Energieverbrauch in Städten und die Emission der damit verbundenen überschüssigen Wärmeenergie entsteht eine kleinräumige Verteilung des Temperaturfeldes. Diese Faktoren beeinflussen insbesondere die Oberflächentemperaturen. Die Lufttemperatur ist aufgrund horizontaler und vertikaler Austausch relativ homogener als die Oberflächentemperaturen.

3.2.3 Erhöhte Grenzschichten und verstärkt instabile Schichtung in der Nacht

Durch die Gebäude wird mechanische Turbulenz induziert, die zu gegenüber dem Umland verstärkter vertikaler Durchmischung und einer verminderten Stabilität der Schichtung innerhalb der städtischen Hindernisschicht führt. Eine geringere Stabilität der atmosphärischen Schichtung in Stadtgebieten ist aber auch eine Folge des Wärmeinsel-Effekts; die bodennahe Temperatur nimmt nachts in der Stadt weniger stark ab als im Umland, sodass eine veränderte atmosphärische Schichtung resultieren kann (Bohnenstengel et al. 2014). Dieses kann auch einen Einfluss auf die turbulente Mischung von Schadstoffen haben und z. B. die Ozonkonzentration nahe der Oberfläche während der Nacht erhöhen (Zhang und Rao 1999).

3.2.4 Reduzierte Verdunstung

Infolge der geringeren Vegetation und Wasserspeicherung, der verbreiteten Abführung von Niederschlagswasser durch die Kanalisation und des oft niedrigen Grundwasserspiegels ist in Städten auch die Verdunstung geringer. In der MRH können

auch Gebiete mit hohem Grundwasserspiegel eine reduzierte Verdunstung aufweisen, wenn die Oberflächen versiegelt sind.

3.2.5 Reduzierte Windgeschwindigkeit und verstärkte Böigkeit

Aufgrund der vielen Gebäude ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in Städten reduziert. Lokale Maxima treten vor allem in Straßenschluchten mit Öffnung in Richtung Seen, Flüssen oder großer unbebauter Brachflächen auf. Vor allem dort verursachen die Gebäude eine hohe Böigkeit; der Windkomfort ist daher in Städten nahe Gewässern oder großen unbebauten Brachflächen geringer als in dicht bebauten Teilen des Stadtgebietes.

3.2.6 Auftreten von Flurwindsysteme und regionaler Windsysteme

Durch horizontale Temperaturdifferenzen benachbarter Gebiete (Stadt/Umland) wird eine allgemein schwache, meist nicht kontinuierliche fließende Ausgleichströmung zum wärmeren Gebiet hin initiiert. Da die stärksten Temperaturdifferenzen in der Regel abends und nachts auftreten, ist ein solcher Flurwind eher zu diesen Tageszeiten als schwach ausgeprägte Brise und jahreszeitlich eher von Juni bis September wahrzunehmen (Barlag und Kuttler 1990/91). Trotz schwacher Ausprägung führt dieser Flurwind an Tagen mit ausgeprägter UHI nachts zu einer Zufuhr kühlerer Luft aus dem Umland in die Stadt. Auch innerhalb der Stadt können derartige temperatenausgleichende Strömungen entstehen, z. B. im Einflussbereich großer Wasser- oder Grünflächen. Allerdings ist die Eindringtiefe in die Siedlungsfläche in Abhängigkeit von der Bebauungsstruktur auf wenige hundert Meter begrenzt (GEONET 2012). Die Mindestgröße einer Grünfläche für Flurwinde sollte etwa 1 ha betragen (Scherer 2007). Die Windgeschwindigkeit solcher Flurwindssysteme liegt meist unter 2 m/s (Mosimann et al. 1999).

Bei hoher nächtlicher Ausstrahlung bildet sich vor allem über Grünland bodennah Kaltluft aus, die bei ausreichender Geländeneigung (mindestens 1°) aufgrund der Schwerkraft dem Hang folgend abfließt. Diese Kaltluft hat für angrenzende Siedlungsräume bei sommerlichen Hitzeperioden für die Abkühlung und den Luftaustausch eine besondere Bedeutung. Auch diese Kaltluftflüsse treten in der Regel intervallartig auf und versiegen im nächtlichen Verlauf, insbesondere wenn die Höhenunterschiede im Gelände nur gering sind.

Küstennahe Städte der MRH sind zudem von nachmittäglichen Seewinden beeinflusst, insbesondere im Frühjahr und Frühsommer. In einer Stadt im Landesinnern wie Hamburg (ca. 100 km landeinwärts von der Nordsee, 80 km von der Ostsee entfernt) tritt der küstennah wirkende Seewind selten auf, da die Seewindfronten in der Regel nur bis etwa 40 km ins Landesinnere vordringen (Schlünzen 1990). Die tatsächlichen Ausprägungen des Seewindes hängen von meteorologischer Situation, Wasser- und Landtemperaturen, Küstenform, Orographie, bei Wattflächen von der Tide und mehr ab. Untersuchungen meteorologischer und landspezifischer Einflüsse auf die

Land-Seewind-Zirkulation sind bei Crosman und Horel (2010) zusammengefasst.

3.2.7 Bewölkung, Sonnenscheindauer, Strahlung

Die höheren Temperaturen über der Stadt können eine Intensivierung konvektiver Prozesse auslösen und damit zu früherer und kräftigerer Wolkenbildung führen. Entsprechend wirkt der über der Stadt deutlich erhöhte Anteil von Aerosolteilchen bzw. Kondensationskernen. Diese Unterschiede lassen sich insbesondere bei geringeren Gesamtbedeckungsgraden feststellen. Mit der höheren Dichte von Aerosolteilchen über der Stadt sinkt aufgrund höherer atmosphärischer Trübung die Sonneneinstrahlung auch bei wolkenlosem Himmel, wobei das Winterhalbjahr stärker betroffen ist als die sommerliche Zeit. Die geänderte Aerosoldichte muss über der Stadt nicht unbedingt zu einer markanten Minderung der Sonnenscheindauer führen. Hier mag eher der „Umweg“ über die Bewölkung maßgeblich sein. Landsberg (1981) gibt in seiner Übersicht über Städte ein Mehr an Bewölkung von 5–10 % sowie entsprechend eine Reduktion für die Sonnenscheindauer von 5–15 % an. Untersuchungen zeigen, dass sich die atmosphärischen Trübungsverhältnisse über dem zentralen Europa durch verringerte Emissionen in den letzten Jahrzehnten sichtbar gebessert haben (Schütz und Kandler 2006; Behrens 1998).

3.2.8 Veränderte Niederschlagsverteilung

Die städtische Wärmeinsel und das Stadtgefüge führen zu Konvergenzen und mehr Aufwinden im Strömungsfeld, was zu erhöhten Niederschlägen im Lee einer Stadt führen kann (Shepherd et al. 2002). Wenn ein Stadtgebiet eine hohe Emission von z. B. Schwefeldioxid (SO₂) aufweist, könnte das Stadtgebiet selbst den Niederschlag reduzieren; jedoch ist der Einfluss von Aerosolen noch unsicher (Pielke et al. 2007). Sowohl die Erhöhung als auch die Verringerung von Niederschlägen im Lee der Stadt kann u. a. von der Aerosolzusammensetzung, der Wetterlage und den städtischen Gegebenheiten abhängig sein (Han et al. 2014). Urbane Niederschlagseinflüsse sind in Veränderungen des Niederschlags in Windrichtung sichtbar, wie z. B. Pagenkopf (2011) mit einer leeseitigen Niederschlagserrhöhung bei Schauerlagen zeigt. Für Köln (Ptak et al. 2013) werden derartige Einflüsse allerdings nicht aufgezeigt; dort dominieren orographische Effekte.

Große Niederschlagsmengen stellen die städtische Infrastruktur vor Herausforderungen und könnten zur Überflutung von Straßen und Häusern oder sogar zum Zusammenbruch der Infrastruktur führen. Die Sommerniederschläge von konvektiven Wolkensystemen könnten lokale Überschwemmungen verursachen, wie das Ereignis vom 6. Juni 2011 in der Innenstadt von Hamburg zeigt, als innerhalb kürzester Zeit auf engem Raum mehr Niederschlag fiel als im vieljährigen Mittel im Monat zu erwarten ist (de Paus et al. 2011), oder einige Wochen später in Rostock (22./23. Juli 2011), als fast das Doppelte des durchschnittlichen monatlichen Niederschlags innerhalb eines Tages

fiel (Miegel et al. 2014). Die Zunahme der klimatologischen mittleren Winterniederschläge um 12–38 % gegen Ende dieses Jahrhunderts (Rechid et al. 2014, ► Abschn. 2.4) stellt eine zusätzliche Herausforderung für Stadtplaner vor allem im Winter dar, wenn die Verdunstung gering ist. Sobald der Boden gesättigt ist, ist es sogar noch wichtiger, Pläne für die Verteilung des überschüssigen Wassers in städtischen Gebieten zu entwickeln. Dazu gehört auch, das Mehr des winterlichen Niederschlags zum Ausgleich zukünftig geringerer Niederschläge im Sommerhalbjahr bzw. für Dürreperioden zu speichern.

3.2.9 Verstärkte Luft- und Lärmbelastung

Die Emission von Luftschadstoffen hat bundesweit seit 1990 z. T. erheblich abgenommen (UBA 2016). Einzelquellen wurden durch emissionsmindernde Maßnahmen stark reduziert, während die Emissionen aus Verkehr und Landwirtschaft heute relativ bedeutender geworden sind. Die durch neue Emissionsnormen möglichen Emissionsreduktionen im Verkehr sind dabei teilweise durch die zunehmende Anzahl von Fahrzeugen kompensiert worden, teilweise entsprechen die tatsächlichen Fahrmodi nicht denen bei den Zulassungsprüfungen verwendeten. Die Konzentrationen haben so insgesamt weniger abgenommen, als die theoretischen Emissionswerte der Fahrzeuge erwarten lassen. Primär emittierte Stoffe (z. B. Stickstoffoxide, Ammoniak, organische Verbindungen) können in der Atmosphäre chemisch reagieren und als sekundäre Luftschadstoffe Ozon oder Partikel (PM_{2.5}) bilden. Die zeitliche und räumliche Verteilung der Konzentrationen der primär emittierten Stoffe wird dabei erheblich von den Emissionen bestimmt, bei den sekundär gebildeten Stoffen spielen in Mitteleuropa die vorherrschenden Wetterlagen eine wesentliche Rolle. Kaminski (2014) zeigt hierzu Zusammenhänge auf.

Größere Partikel (PM₁₀: Grobstaub) entstehen primär mechanisch durch Verwitterung, Aufwirbelung, Abrieb und Zerplatzen von Tröpfchen oder sekundär durch Wachstum kleinerer Partikel oder Umwandlung von Vorläufergasen (PM_{2.5}: Feinstaub). Sie können in unserer Umwelt natürlich vorkommen oder anthropogen verursacht sein. Zu vermuten ist, dass der relative Anteil der Partikelemissionen des Personen- und Güterverkehrs (z. B. Abriebprozesse) an der PM₁₀-Fraktion weiter ansteigen wird. Für das Jahr 2050 wird je nach Wirtschafts- und gesellschaftlichem Szenario ein Pkw-Bestand zwischen 614 und 706 Pkw pro 1000 Einwohner projiziert (BMVBS 2006), was gegenüber 2003 mit 544 Pkw/1000 Einwohner (nach Dudenhöfer 2004) nochmals eine deutliche Zunahme bedeutet. Auch wenn Emissionsminderungen in vielen Sektoren stattfanden und stattfinden werden, so könnten neue Emittenten hinzukommen, wie seit einigen Jahren PM₁₀ aus Holzfeuerungen, die inzwischen über den PM₁₀-Emissionen aus Auspuffen liegen (Dauert et al. 2015). In Städten wird an mehr als der Hälfte der verkehrsnahen Stationen der Grenzwert von 40 µg/m³ für den NO₂-Jahresmittelwert überschritten – ohne Tendenz zur Abnahme (Dauert et al. 2015).

Partikelkonzentrationen aus anthropogenen Quellen entstehen vor allem in Städten. Durch die Emissionen aus einer Vielzahl anthropogener Quellen (Verkehr, Haushalte, Industrie) in hoher räumlicher Dichte sind in Städten die Konzentrationen der

3.3 • Gegenwärtiges Stadtklima Hamburgs

Primärschadstoffe erhöht. Speziell in den Hafenstädten kommen noch die Emissionen von Schiffen hinzu.

Ein Großteil der Emittenten für Stoffe sind auch Verursacher von Lärm in der Stadt. Dieses gilt insbesondere für den Verkehr. Für Lärm existieren im Gegensatz zur Luftbelastung keine Grenzwerte, sondern Richtwerte, die im Hinblick auf die Gesundheit gewählt sind. Nach Heinrichs et al. (2015:38) werden in den meisten europäischen Ländern 45 Dezibel (dB(A)) als Empfehlungswert für die Nacht und 50–55 dB(A) für den Gesamttag verwendet. Richard et al. (2015) stellen fest, dass in Deutschland allein „... an den betrachteten Straßen ... rund 10,2 Mio. Menschen von ... über 55 dB(A) betroffen“ sind, was etwa 12 % der Bevölkerung entspricht. Da die Verkehrslärmquellen in der Stadt verstärkt vorkommen, ist hier eine mindestens ebenso hohe Betroffenheit vorhanden.

3.3 Gegenwärtiges Stadtklima Hamburgs

3.3.1 Stadteffekte auf die Temperatur

3.3.1.1 Mittlere Temperaturen

Im Stadtbereich Hamburgs liegt, auf größere Flächen bezogen, die Jahresmitteltemperatur im klimatischen Mittel etwa 0,1 K oberhalb der des Umlandes (Trusilova und Riecke 2015). Lokal sind die Unterschiede höher und können im Jahresmittel bis zu 1,2 K betragen (Regression mit floristischen Proxidaten und Messungen; Bechtel und Schmidt 2011). Je nach städtischer Überprägung betragen die mittleren Temperaturunterschiede zum Umland basierend auf Messungen zwischen 0,25 K (suburbane Stadtteile; Wiesner et al. 2014) über 0,5–0,7 K (Fuhlsbüttel, Wandsbek, Kirchwerder, Neuwiedental; Schlünzen et al. 2010) und 0,9 K am Wettermast (umgerechnet aus Brümmer et al. 2012) bis zu 1,2 K (Innenstadt und Hafencity; Bechtel et al. 2014; Schlünzen et al. 2010; Wiesner et al. 2014).

3.3.1.2 Temperaturen tagsüber

Die mittleren Unterschiede sind tagsüber geringer ausgeprägt (0,4 K in der Innenstadt bzw. in Wandsbek, Wiesner et al. 2014 bzw. Schlünzen et al. 2010) und weisen meist einen Jahresgang auf. Dieser zeigt im Sommer lokal sogar Verminderungen der Maximaltemperatur gegenüber dem Umland (etwa –0,4 K für Neuwiedental und Fuhlsbüttel) oder nur leicht höhere Werte als im Umland (etwa 0,1 K in St. Pauli und 0,2 K in Kirchwerder; Schlünzen et al. 2010). Im Winter sind die Maximaltemperaturen im Bundesland Hamburg fast überall höher als im Umland (zwischen 0 K in Kirchwerder und 0,6 K in St. Pauli; Schlünzen et al. 2010).

3.3.1.3 Temperaturen nachts

Die größten Differenzen der Lufttemperaturen entstehen erwartungsgemäß nachts, allerdings auch hier mit großen räumlichen Unterschieden, wie **Abb. 3.2** verdeutlicht. Hier ergeben sich für den Sommer mittlere Temperaturüberhöhungen (20–24 Uhr) von 0,2 K (Vororte) bis 0,9 K (südliche Innenstadt und Hafengebiet; Klimamittel 1981–2010 gegenüber Mittel der Stationen Grambek und Ahrensburg; METRAS 250 m Auflösung; Boettcher pers.

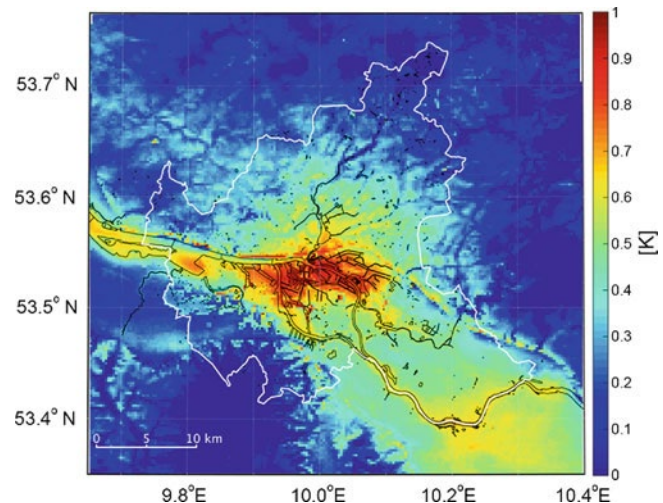
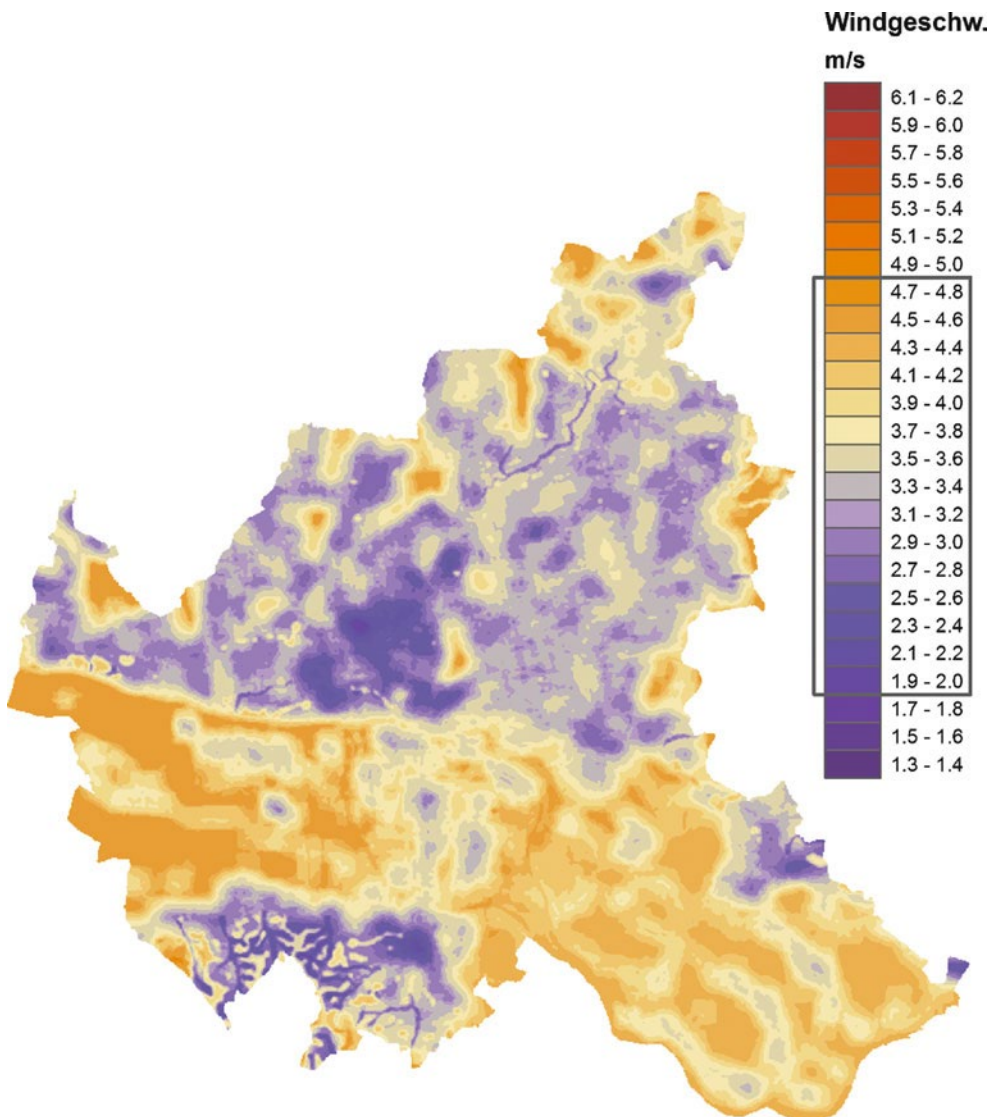


Abb. 3.2 Mittlere nächtliche Wärmeinsel im Sommer für Ist-Klima und Ist-Bebauung. Die Werte wurden auf einem 250-m-Raster mit dem Modell METRAS (Schlünzen 1990; Grawe et al. 2013; Schoetter et al. 2013) aus halbstündlichen Mittelwerten für die Zeit von 20 bis 24 Uhr als Differenz zu den mittleren Werten an der Station Grambek und Ahrensburg errechnet. Bild bereitgestellt von Boettcher. (Pers. Mitteilung)

Mitteilung). Bei Modellrechnungen auf 4 km Gitter betragen die Unterschiede etwa 0,8 K (Boettcher et al. 2015). Hoffmann et al. (2016), die mit METRAS bei 1 km Auflösung mit Wetterlagen von 1971–2000 die Wärmeinsel mit einer statistisch-dynamischen Verfeinerung errechneten, simulierten klimatisch mittlere abendliche sommerliche Temperaturdifferenzen für die starke Wärmeinsel von bis zu 1,2 K für die Innenstadt (20–24 Uhr; Hoffmann et al. 2016, Fig. 8). Die Modellrechnungen sind alle Flächenmittel und enthalten nicht den Effekt anthropogener Wärme, der je nach Uhrzeit und Ort zwischen 0,1 und 0,5 K beträgt (Petrik et al., pers. Mitteilung). Messwerte dagegen enthalten alle Einflüsse und zeigen dementsprechend auch im dekadischen Mittel höhere Unterschiede, die in den Minimaltemperaturen noch ausgeprägter sind. Diese reichen lokal von 0,7 K (Fuhlsbüttel) bis 1,7 K (St. Pauli) im Winter und von 0,9 K (Fuhlsbüttel) bis 2,7 K (St. Pauli) im Sommer gegenüber der Messstation Grambek (s. dazu auch von Storch und Claussen 2011, S. 54).

3.3.1.4 Einzelwerte

Auch kürzere Messzeitreihen führen auf Unterschiede zwischen 1 und 3 K (Arnds et al. 2015; De Ridder et al. 2015; Seidel et al. 2016; Wiesner et al. 2014), die durch aus Satellitendaten abgeleitete Lufttemperaturen bestätigt werden können (Bechtel et al. 2014). In seltenen Einzelfällen werden deutlich höhere Werte ermittelt: Bechtel et al. (2014) fanden über 6 K für die Hafencity und die Innenstadt, Wiesner et al. (2014) bestimmten 6,9 K als 90. Perzentil für den Stadtbereich, GEONET (2012) simulierte 9,5 K für eine autochthone Wetterlage, und Hoffmann et al. (2012) fanden 10,5 K als Einzelwert aus Messdaten. Derartig hohe Temperaturunterschiede zum Umland sind selten und nicht eindeutig auf anthropogenen Einfluss zurückzuführen.



■ **Abb. 3.3** Mittleres Jahresmittel (1980–1989) der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund auf der Basis des Statistischen Windfeldmodells des Deutschen Wetterdienstes auf einem 50-m-Raster. (Gerth und Riecke 1999)

3.3.1.5 Ursachen der Unterschiede

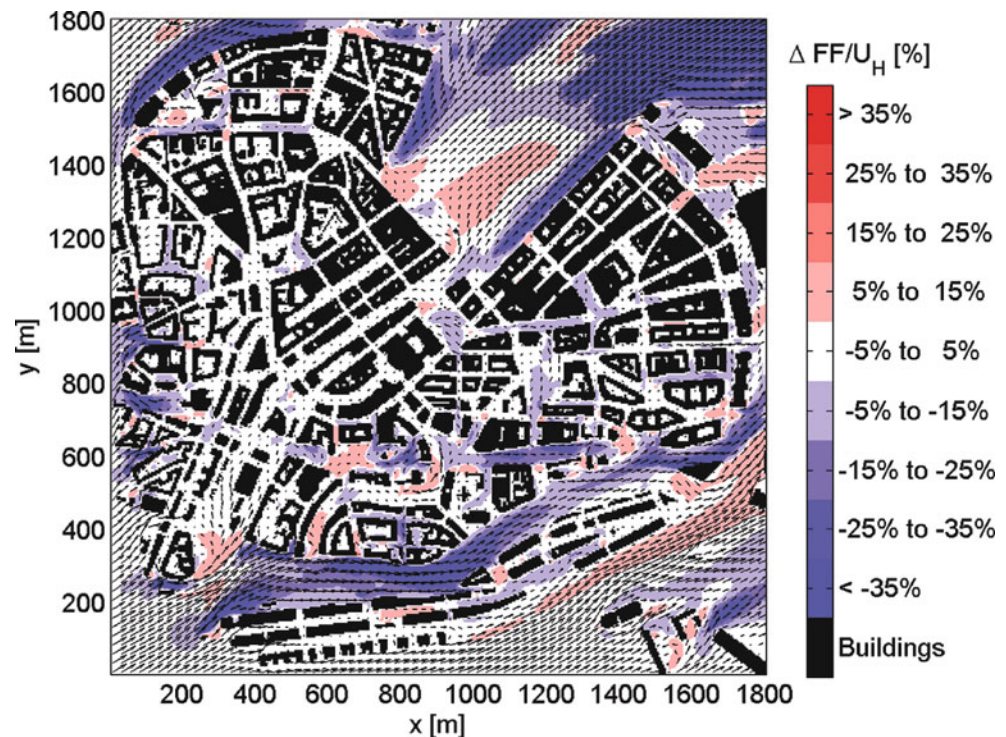
Die Temperaturüberhöhungen sind im Stadtgebiet ungleich verteilt. Neben der Versiegelung haben Gewässer einen nicht unerheblichen Einfluss (■ **Abb. 3.2**). Mehr als 3 % der Fläche des Stadtstaates Hamburg sind Wasserflächen (Kanäle, Teiche, Seen, Flüsse; Teichert 2013). Nahe den innerstädtischen Gewässern ist im Sommer eine advective Kühlung tagsüber und eine verminderte Abkühlung bei Nacht spürbar, da die Wasserflächen den Tagesgang dämpfen. Dies führt zu wärmeinselähnlichen Effekten bei Nacht durch Advektion warmer Luft von den angrenzenden Gewässern (Schlünzen et al. 2010).

Tagsüber können die großen Gewässer wie die Elbe stromabwärts des Hamburger Hafens eine Flussbrise hervorrufen, die im Bereich der Unterelbe Auswirkungen auf die Temperaturen bis in einige 1000 m abseits des Flusses haben könnte, wie Teichert (2013) für eine ruhige Wetterlage im Sommer in einer Simulation mit METRAS zeigte. Allerdings sind um diese Zeit die stadtbedingten Zusatzeffekte sowieso relativ gering (0,4 K in der Innenstadt gegenüber Langenhorn; Wiesner et al. 2014). Dabei ist zu beachten, dass eine Kühlung am Tage durch Gewässer nur

gewährleistet ist, wenn die Wassertemperatur niedriger ist als die Temperaturen der Landflächen. Die Temperatur des Wassers wird jedoch u. a. durch dessen Verwendung beeinflusst: Wasser wird u. a. für die Trinkwasserversorgung entnommen, für die Industrieproduktion oder für die Kraftwerkskühlung und teilweise als Abwasser wieder eingeleitet – gereinigt, aber mit Temperaturen, die oft oberhalb der Temperatur des entnommenen Wassers liegen. Dies kann die Temperaturen der Flüsse ganzjährig erhöhen, insbesondere wenn der Fluss Gezeiten unterworfen ist und dasselbe Wasser mehrfach genutzt werden könnte. So gibt es für die Tideelbe Vorschriften (Sonderaufgabenbereich Tideelbe 2008), um eine Flusstemperatur über 28 °C zu vermeiden. Ein Fluss, der für die Einleitung von warmem Abwasser genutzt wird, könnte als ganzjähriges Zentralheizungssystem wirken, vor allem nachts. Dies kann im Winter von Vorteil sein, im Sommer aber eine advektiv bedingte Abkühlung tagsüber und insbesondere nachts vermindern.

Derartige von Gewässern induzierte Kühleffekte werden in den nicht bebauten, niedriger gelegenen Fluss- und Kanalbereichen nördlich der Elbe sichtbar (■ **Abb. 3.2**). Auch die weniger

■ **Abb. 3.4** Modellsimulation der Windverhältnisse in der Hamburger Innenstadt unter Berücksichtigung des Bewuchses bei westlicher Anströmung. Farblich ist der Bewuchseinfluss auf die Windgeschwindigkeit in Form von Verstärkungen und Minderungen der Windgeschwindigkeit im Vergleich zur Situation ohne Bewuchs gezeigt. (Aus Salim et al. 2015; reprint permitted under Creative Commons Attribution-Non-Commercial-No Derivatives License (CC BY NC ND))



Wärme speichernden großen Grünflächen im innenstadtnahen Bereich sowie in den weniger dicht bebauten nördlichen Stadtteilen Hamburgs führen auf eine im Sommermittel geringere UHI dort als im innenstadtnahen Bereich. Die nach Südwesten orientierten Geesthänge zeigen sich als noch durch die nachmittägliche und abendliche Sonne erwärmte Bereiche nördlich des Elbtals. Die niedrigeren Temperaturen im Süden Hamburgs haben zwei andere Ursachen: Zum einen liegen die Harburger Berge etwa 50–150 m höher als die Innenstadt und sind dadurch kühler, zum anderen ist das Gebiet recht grün und wenig bebaut.

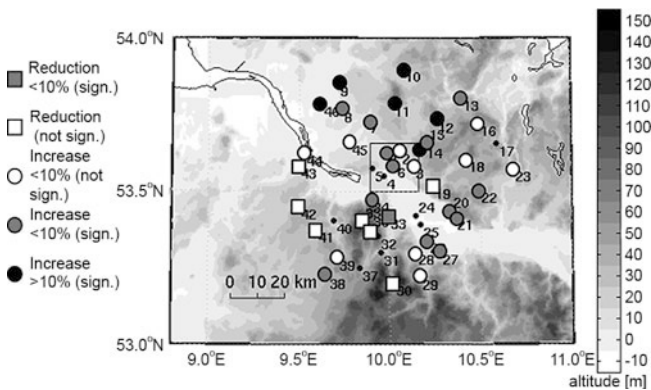
Neben der Beschreibung der stadtbedingten Temperaturunterschiede zum Umland geben Kenntage ein Bild über Unterschiede in der Temperaturverteilung. Dies sind z. B. die sog. Sommertage bzw. die heißen Tage (Tageshöchsttemperatur mindestens 25 bzw. 30 °C) oder die Tropennächte (Minimaltemperatur nicht unterhalb 20 °C). Trusilova und Riecke (2015) stellen anhand von Messungen 22 Sommertage bzw. 3 heiße Tage und 0 Tropennächte, anhand von COSMO-CLM-Modellrechnungen (2,8 km Gitter) 29 Sommertage bzw. 6 heiße Tage und 3 Tropennächte im Umland fest (Periode 1989–2008). Aus den Modellergebnissen abgeleitet, liegt die Anzahl im Stadtgebiet gegenüber dem freien Umland im Mittel um 5 bzw. 2 Tage höher. Die Zahl der Tropennächte ist gleich. Etwas geringere Werte findet GEONET (2012) mit, je nach Siedlungsstruktur, 10–21 Sommertagen, 2–6 heißen Tagen und 0,5–1 Tropennächten bei einem nur 10-jährigen Bezugszeitraum (2001–2010). In diesem Zusammenhang soll auch auf andere Datenquellen (u. a. klimafolgenonline, norddeutscher-klimaatlas, klimanavigator) hingewiesen werden, da sie vielfach auf unterschiedlichen Berechnungsansätzen beruhen und somit die Ergebnisse gewisse Abweichungen voneinander aufweisen. So gibt z. B. die Webseite

von klimafolgenonline als 30-jähriges Mittel (1981–2010) für die Fläche des Bundeslandes Hamburg 26,5 Sommertage an. Es wird zukünftig von besonderer Bedeutung sein, sich mit den Bandbreiten der Klimaparameter zu befassen und dabei sehr genau auf die Ergebnisherleitung zu achten.

3.3.2 Stadteffekte auf den Wind

Der von der allgemeinen Luftdruckverteilung bestimmte Wind wird in Geschwindigkeit und Richtung durch städtische Gegebenheiten unterschiedlich stark modifiziert (► Abschn. 3.2). ■ **Abb. 3.3**, die das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit, berechnet mit dem statistischen Windfeldmodell (Gerth und Christoffer 1994) des Deutschen Wetterdienstes (Gerth und Riecke 1999), zeigt, veranschaulicht mit Werten zwischen 1,9 und 4,8 m/s die Heterogenität der Windgeschwindigkeitsstruktur im Bundesland Hamburg, ohne die Bebauungsstruktur selbst im Detail aufzulösen bzw. zu berücksichtigen. Die dadurch möglichen Kanalisierungen fehlen hier; nur die mittleren Abbremsungseffekte wurden berücksichtigt. Gebiete mit hoher Bebauungsdichte (Innenstadt und Bereiche westlich der Alster oder Harburg) bzw. Waldflächen (z. B. im Norden Hamburgs und Harburger Berge) weisen verminderte Windgeschwindigkeiten auf, während Lagen mit geringeren Bodenrauigkeiten vor allem entlang der Elbmarschen insgesamt ein höheres Windgeschwindigkeitspotenzial zeigen.

Für die kleinräumige Betrachtung des Einflusses der Stadt auf das Windfeld ist es wichtig, die Bebauung und auch den Bewuchs aufgelöst zu betrachten. Abhängig von verschiedenen Wetterlagen und den daraus resultierenden unterschiedlichen Anströmrichtungen stellen sich lokal in Schneisen oder Straßenschluchten Geschwindigkeitsüberhöhungen bzw. -verminderungen ein. Die Ge-



■ **Abb. 3.5** Durchschnittliche Änderung der Niederschläge (in %) pro Ereignis, wenn der Standort in Lee des Stadtzentrums liegt (gekennzeichnet mit Quadrat). Abbildung basiert auf Ergebnissen von Schlünzen et al. (2010). Schwarz und grau markierte Kreise bezeichnen signifikante Anstiege, graue Quadrate signifikante Abnahmen. Weiße Quadrate und Kreise entsprechen nichtsignifikanten Veränderungen

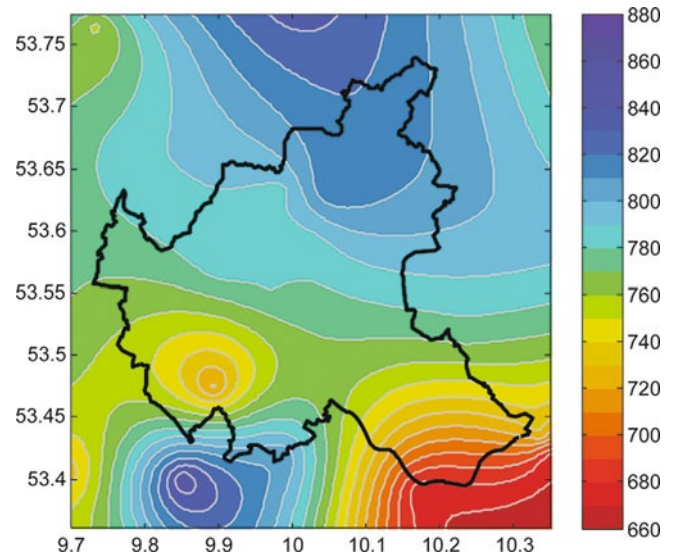
schwindigkeitszunahmen in Schluchten oder auf Plätzen können durch Straßenbäume reduziert werden. Salim et al. (2015) stellen mittels Modellsimulationen mit dem Modell MITRAS (Schlünzen et al. 2003) die Windverhältnisse im Hamburger Stadtkern unter spezieller Berücksichtigung des Baumbestandes dar (■ Abb. 3.4). In den blau angelegten Bereichen wird die Windgeschwindigkeit durch den Straßenbaumbestand im Vergleich zum baumfreien Zustand gemindert und damit der Windkomfort erhöht, in den rötlichen wird der Wind verstärkt. Letztere Zunahmen interpretieren Salim et al. (2015) als Ausgleichsströmungen zu Bereichen mit Geschwindigkeitsreduktionen.

Unter dem Aspekt des Stadtklimas (Wärmeinsel, Schattenwirkung, Böenreduzierung etc.) ist hoher Bewuchs hilfreich, allerdings mit dem Nachteil, die nächtliche Frischlufterneuerung im Sommer zu behindern. Einige Stadtbäume können zudem biogene Kohlenwasserstoffe emittieren, die als Vorläufergase eine wesentliche Rolle bei der Ozonbildung einnehmen. Dies gilt etwa für Isopren, das die höchsten Konzentrationen am Nachmittag heißer Sommertage erreicht (Wagner und Kuttler 2014).

Nächtliche Kaltlufterneuerung für Stadtbereiche ist an nachbarliche größere Grünflächen als Kaltluftentstehungsgebiete bzw. an eine ausreichende Geländeneigung gebunden (► Abschn. 3.2). Solche Areale sind z. B. in den Bereichen der Harburger Berge (Schlünzen et al. 2011) oder auch in Teilen des Stadtparks anzutreffen (GEONET 2012). Die Eindringtiefen werden von GEONET (2012) im innerstädtischen Bereich mit bis zu 150 m angegeben, bei geringer Bebauung bis 1300 m. Ein Anteil von 17 % der Hamburger Grünflächen wird als hoch bis sehr hoch für die stadtplanerische Bedeutung eingeschätzt.

3.3.3 Stadteffekte auf den Niederschlag

Die städtische Niederschlagsauswirkung kann zu einer Niederschlagsverstärkung in Lee des Stadtgebietes führen. Dies wurde auch für Hamburg aus Messdaten bestimmt (Schlünzen et al. 2010). Die Zuwächse liegen im Bereich von 5–10 % pro Nieder-

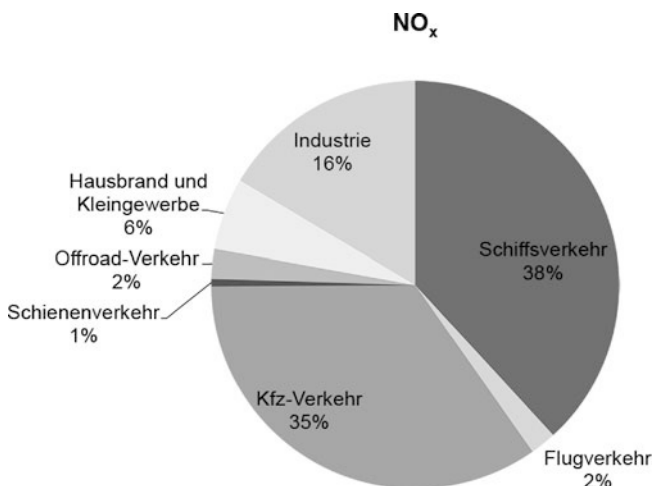


■ **Abb. 3.6** Klimatisch mittlere Niederschlagsverteilung für Hamburg. (Ertl 2010)

schlagsereignis und gelten für viele (aber nicht alle) Lagen in Lee der Stadt (■ Abb. 3.5). Die leeseitige Niederschlagserrhöhung ist im Winter höher (Ertl 2010). Angenommen, es gäbe nur eine Windrichtung, dann könnte die Differenz 80 mm pro Jahr ausmachen. Dies ist immer noch fast um den Faktor 2 geringer als die klimatischen Unterschiede in der Region (■ Abb. 3.6; s. auch ► Abschn. 2.2.3); sie weisen eine Abnahme von 130 mm von Norden in Richtung Südosten auf (Hoffmann und Schlünzen 2010). Somit könnten trotz der städtischen Auswirkungen die regionalen Effekte für Hamburg von größerer Bedeutung sein.

Schlünzen et al. (2010) untersuchten auch langfristige Veränderungen der Niederschläge. Die dortige Abbildung 6 zeigt, dass an einem Standort in Luv der Stadt die Niederschläge mehr zunehmen als an Standorten in Lee des Stadtgebietes (Trend 1947–2007), was auf einen veränderten städtischen Einfluss hindeuten könnte. Eindeutige Ursachen hierfür konnten aber nicht identifiziert werden. Detaillierte Modellstudien mit METRAS von Schoetter (2013) zeigen, dass die Auswirkungen des städtischen Einflusses auf den Niederschlag für Hamburg nur in einigen meteorologischen Situationen zu beobachten sind. Han et al. (2014) weisen darauf hin, dass die Orographie eine zusätzliche Rolle spielt. Auch wenn in Hamburg die höchsten Erhebungen nur 100–150 m betragen, sind bei den niedrigen Gebäuden (nur vier Gebäude von mehr als 100 m Höhe) orographische Effekte auf die Niederschlagsverteilung beobachtbar (Schlünzen et al. 2010) und modellierbar (Schoetter 2013). Die Effekte sind sehr lokal (wie auch aus ■ Abb. 3.5 abgeleitet werden kann) und hängen von der betrachteten Wetterlage ab. Alles in allem sind die Auswirkungen der Stadtstruktur für den Sommer nicht signifikant.

Hinsichtlich der Anzahl von Starkregentagen mit Tageshöhen von 10 und 20 mm zeigen die Berechnungen von Trusilova und Riecke (2015) im Durchschnitt über dem Stadtgebiet von Hamburg einen zusätzlichen Tag im Vergleich zum Umland. Der Einfluss auf die täglichen Niederschlagshöhen von mindestens 20 mm



■ Abb. 3.7 Emissionen aus verschiedenen Sektoren für Hamburg. (Basiert auf Daten von Böhm und Wahler 2012)

entspricht der im 1. HKB (von Storch und Claussen 2011) zitierten Größenordnung (dortige auf die Jahre 1954–1967 bezogene Abbildung 2.36). Für eine Tageshöhe von 30 mm ergeben sich keine erkennbaren Unterschiede.

3.3.4 Stadteffekte in der Luftqualität

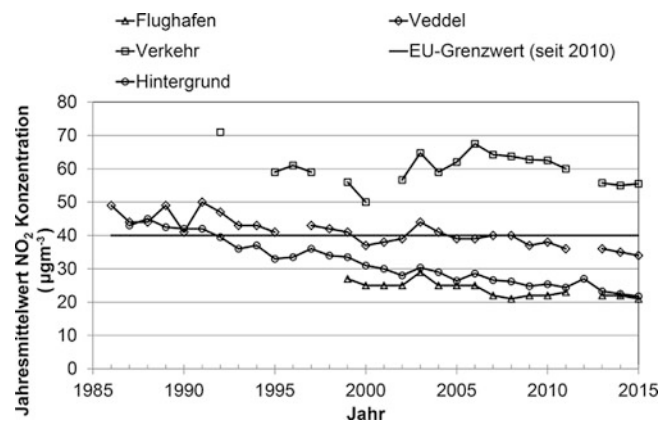
Auto- und Schiffsverkehr sind in Hamburg Hauptquellen für NO_x und Partikel. 78 % der NO_x-Emissionen, und 53 % der PM10-Emissionen stammen aus dem Verkehr. Dabei haben die Schiffsemissionen einen Anteil von 38 % an den gesamten NO_x-Emissionen (■ Abb. 3.7).

Verkehrsemissionen (mit Ausnahme des Luftverkehrs) sind bodenbasiert und erhöhen damit direkt die Konzentrationen im Stadtgebiet. Messungen zeigen Überschreitungen des Jahresgrenzwertes der NO₂-Konzentration von 40 µg m⁻³ hauptsächlich an verkehrsbelasteten Orten (■ Abb. 3.8), an denen die Luftmassen durch Gebäude begrenzt und weniger durchmischt sind als in weniger bebauten Gebieten (Böhm und Wahler 2012). In Hafennähe (Veddel) liegen die Werte derzeit unter dem Jahresgrenzwert von 40 µg m⁻³, jedoch oberhalb des städtischen Hintergrundes von 29 µg m⁻³ in 2010 (Böhm und Wahler 2012, S. 48).

Die Luftbelastung ist in der Stadt zwar kontinuierlich zurückgegangen, da aber auch die Grenzwerte in den vergangenen Jahren verschärft wurden, haben sich die Überschreitungen kaum verändert (Dauert et al. 2015, Abbildung 6). Die Grobstaubentwicklung zeigt ein Einhalten der Grenzwerte sowohl für PM10 als auch für PM2.5 (FHH 2016b).

Mit der Entwicklung neuer Wohngebiete an den Flussufern werden die Luftmassen in Hafennähe begrenzter sein, und die Schiffsemissionen könnten lokal zu höheren Luftkonzentrationen führen, die mehr und mehr Menschen betreffen. Daher berücksichtigen Pläne zur Reduzierung der Luftschadstoffkonzentrationen heute auch Schiffsemissionen (Böhm und Wahler 2012).

Die Konzentrationen haben einen ausgeprägten Jahresgang, der für NO₂ zu niedrigeren Werten im Sommer führt (höhere atmosphärische Grenzschichten, geringere Emissionswerte), wäh-



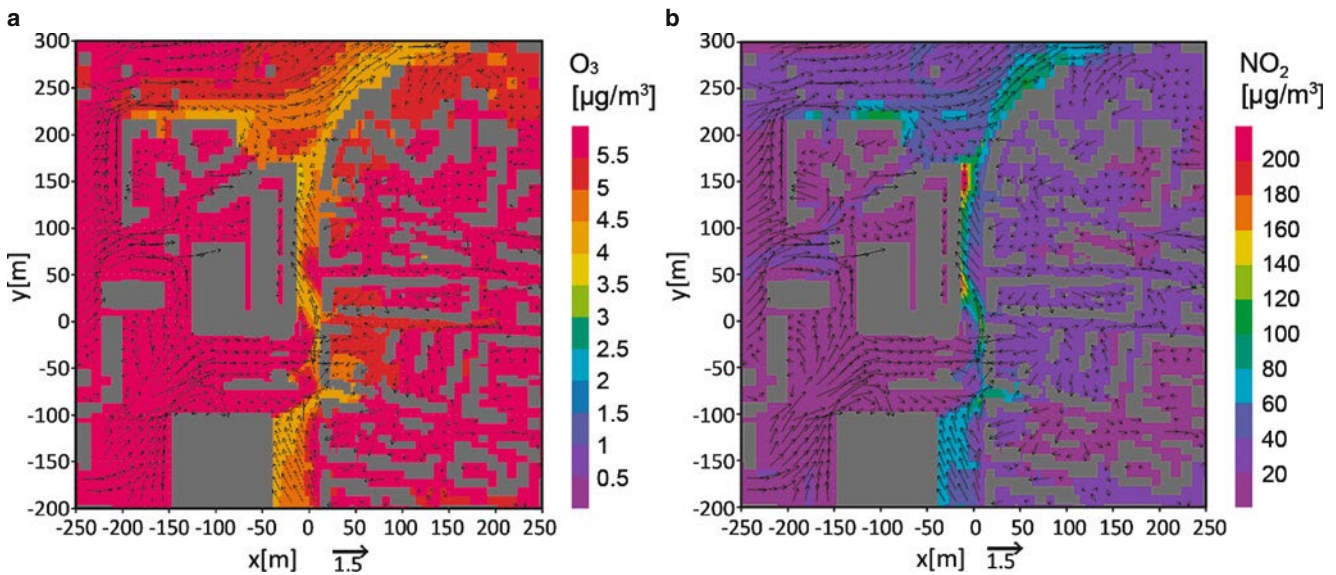
■ Abb. 3.8 Zeitliche Entwicklung der NO₂-Jahresmittelwerte in Hamburg. Verkehrsstationen und alle Hintergrundstationen (ohne Flughafen und Veddel) sind jeweils zusammengefasst (Datenquelle: Hamburger Luftmessnetz 2016, eigene Darstellung). Der Jahresgrenzwert beträgt für NO₂ 40 µg m⁻³

rend Ozon dann maximale Werte aufweist, da die Ozonbildung stark von der Sonneneinstrahlung abhängig ist. Je stärker die Sonne scheint, desto mehr Ozon wird in der Atmosphäre gebildet. In Straßenschluchten wird dieses Ozon abgebaut (■ Abb. 3.9). In Quellentfernung wird die vor allem durch den Kfz-Verkehr emittierte und quellnah gebildete Vorläufersubstanz Stickstoffdioxid unter UV-Strahlung in Stickstoffmonoxid bei gleichzeitiger Bildung eines Sauerstoffatoms umgewandelt, das wiederum mit einem Sauerstoffmolekül zu Ozon reagiert. Parallel dazu werden durch organische Verbindungen weitere chemische Reaktionen initiiert, die letztlich zu zusätzlicher NO₂-Bildung in der Atmosphäre beitragen und so die Ozonbildung verstärken.

In der Gesamtbelastungssituation nimmt Hamburg im europäischen Maßstab eine noch vergleichsweise günstige Position ein (Schümann et al. 2007).

3.3.5 Lärmbelastung in der Stadt

Wie schon in ► Abschn. 3.2 erwähnt, sind Quellen für Lärm und Luftbelastung ähnlich, wobei die startenden und landenden Flugzeuge eine Zusatzquelle für Lärm vor allem tagsüber darstellen. Die Empfehlungswerte (► Abschn. 3.2) auf Hamburg anzuwenden ist nicht direkt möglich, da der Hamburger Lärmaktionsplan (FHH 2008, 2013) für die Nacht nur Werte ab 50 dB(A) ausweist. Werden diese angewendet, so sind hiervon etwa 15 % der Bewohner betroffen, von der Überschreitung der Empfehlungswerte für den gesamten Tag (55 dB(A)) etwa 25 %. Die höchsten Betroffenen entstehen durch Straßenverkehr, der für den gesamten Tag (nachts) für 85 % (95 %) der betroffenen Bewohner die Hauptursache ist. Analog zur Ausbreitung von Luftbeimengungen (■ Abb. 3.9) ist auch die Ausbreitung von durch Straßenverkehr verursachten Lärm in der Straßenschlucht behindert und führt zu lokal erhöhtem und in der Straßenschlucht gefangenem Lärm, sodass die Betroffenheit dort lokal höher oder geringer ausfallen kann. Genaues hierzu lässt sich zurzeit noch nicht angeben, da die Lärmausbreitung in der Stadt noch vergleichsweise einfach ermittelt wird.



■ **Abb. 3.9** Luftbelastung in einer Straßenschlucht: **a** Ozon und **b** Stickstoffdioxid im Horizontalschnitt 1,5 m über dem Boden für den 11. April 2003, 7:00–7:30 Uhr, simuliert mit dem MITRAS/MICTM-Modellsystem. Die Konzentrationsmuster werden durch gebäudeinduzierte Heterogenität im Windfeld verursacht und führen im Beispiel zu zwei lokalen NO_2 -Maxima. (Abbildung b aus Schatzmann et al. 2006)

3.4 Stadtklima Hamburgs bei Klimawandel

3.4.1 Entwicklung der Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland

Für Hamburg fanden Hoffmann et al. (2012) nur geringe Veränderungen in der Intensität der UHI für Klimawandelszenarien, sofern die Stadtstruktur unverändert bleibt. Dieses Ergebnis basiert auf einem statistischen Modell für die Minimaltemperaturen an der Station St. Pauli, wobei Ergebnisse regionaler Klimamodelle genutzt werden. Signifikant sind eine leichte Abnahme der UHI im April sowie geringe Veränderungen der UHI im Winterhalbjahr, die allerdings nur aus Ergebnissen eines von zwei verwendeten regionalen Klimamodellen abgeleitet werden können (Hoffmann et al. 2012, Abbildung 7). Die Intensität der sommerlichen UHI wird auf Basis dieser Ergebnisse zum Ende des Jahrhunderts leicht zunehmen (Hoffmann et al. 2012, Abbildung 8). Analoge Untersuchungen, aber unter Nutzung von Wetterlagenklassifikationen, bestätigen eine fast unveränderte Wärmeinsel im innerstädtischen Bereich Hamburgs (Hoffmann und Schlünzen 2013). METRAS-Modellrechnungen (1 km Auflösung) mit statistisch-dynamischer Verfeinerung zeigen mit unveränderter Stadtstruktur keine Veränderung des sommerlichen UHI-Musters (Temperaturmittel 20 bis 24 Uhr) in der Mitte, wohl aber eine leichte Zunahme zum Ende des Jahrhunderts (+0,1 K im Westen von Hamburg; Hoffmann 2012; Hoffmann et al. 2016). Im Gegensatz dazu finden Trusilova und Riecke (2015) eine geringe Abnahme der UHI von -0,1 K, basierend auf dynamischer Verfeinerung mit dem COSMO-CLM-Modell (2,8 km Auflösung). Beide Ergebnisse zeigen, dass die Interaktion von verändertem Klima und stadtklimatischen Prozessen keine nichtlinearen Reaktionen mit starken Veränderungen auslöst, die andernfalls bei zukünftigen Stadtentwicklungen (► Abschn. 3.5) bedacht werden müssten.

Wenn Schwellenwerte (wie 20 °C bei den Nachttemperaturen) verwendet werden, muss das Gesamtsignal betrachtet werden. Schwellenwerte werden wegen des allgemein höheren Temperaturniveaus in einem zukünftigen Klima häufiger überschritten. Auch die absolute Zahl der zusätzlichen Überschreitungen könnte in den städtischen Gebieten höher als im ländlichen Raum ausfallen, sofern eine zusätzliche Temperatursteigerung im Stadtgebiet dazu beiträgt. Die Projektionsrechnungen von Trusilova und Riecke (2015) zeigen allerdings bis 2050 einen Temperaturanstieg pro 100 Jahre von 1,2 K für den Stadtbereich und von 1,3 K für das Umland. Diese geringfügig stärkere Temperaturzunahme über der ländlichen Umgebung beruht auf einer stärkeren Erwärmung und sommerlichen „Austrocknung“ des Umlands gegenüber der schon vom Grund her wärmeren und trockeneren Stadt. Die Anzahl der Sommertage nimmt sowohl im Stadtgebiet als auch im Umland zu, allerdings aufgrund der leicht höheren Temperaturzunahme im Umland dort etwas weniger stark. Die stärkere Temperaturzunahme insbesondere im südlichen und östlichen Umland Hamburgs wird von verschiedenen Klimamodellen gestützt (vgl. STAR auf Webseiten von klimafolgenonline und diverse Modellergebnisse auf der Webseite des Norddeutschen Klimatlasses). Insgesamt sind nach den durchgeführten COSMO-CLM-Rechnungen (2,8 km Auflösung) für den Zeithorizont Mitte des Jahrhunderts in der Metropolregion zusätzlich bis zu knapp +3 Sommertage zu erwarten; GEONET (2012) bestimmen zusätzliche 6–8 Tage. Hinsichtlich der heißen Tage ergeben sich nach Trusilova und Riecke (2015) maximal +4 Tage in der Stadt gegenüber +1,5 Tagen im Umland. Diese Zahl könnte den Stadteffekt überschätzen, da auch im Ist-Klima der städtische Effekt durch COSMO-CLM etwas überschätzt wird. Die Zunahme ist im gleichen Rahmen wie die von GEONET (2012) bestimmte (+1 bis +5 Tage).

3.4.2 Entwicklung der Bewölkung und Niederschläge

Nach Angaben von Trusilova und Riecke (2015) wird der Niederschlag in ihrer Modellsimulation unterschätzt, da lokale Niederschlagsereignisse vom Modellgitter gar nicht oder nur mit schwächerer Intensität simuliert werden und das Modell die Bildung von konvektivem Niederschlag noch nicht ausreichend berechnen kann. Trotz dieser Einschränkungen lassen sich Hinweise auf die Niederschlagsentwicklung über der Stadt im Vergleich zum Umland ableiten. So zeigt sich, dass es bis zum Jahr 2050 in der Metropolregion zu höherem Jahresniederschlag kommt; die Zunahme ist dabei über der Stadt höher (+40 mm in 100 Jahren: 2000–2100) als über dem Umland (+33 mm in 100 Jahren). Die Niederschlagszunahme wird in der Metropolregion in den 100 Jahren auf bis zu +4 mm/Monat für Winter, Frühjahr und Herbst abgeschätzt, die sommerliche Änderung auf –6 bis +2 mm/Monat. Für die Niederschlagskenntage mit einer täglichen Niederschlagshöhe von ≥ 10 mm bzw. ≥ 20 mm zeigt sich in der Metropolregion ein verbreiteter Anstieg. In Hamburg ist mit +2,5 Tagen (≥ 10 mm) bzw. 1,5 Tagen (≥ 20 mm) pro Jahr für die jeweiligen Kennzahlen zu rechnen. Hinsichtlich einer Tagesniederschlagshöhe von ≥ 30 mm nimmt in Hamburg die Anzahl im Mittel mit etwa 0,5 Tagen/Jahr wie in der Umgebung zu. Im Nordosten der Stadt und im angrenzenden Schleswig-Holstein beträgt die Zunahme derartiger Starkniederschlagstage bis zu 1 Tag pro Jahr (Trusilova und Riecke 2015). Die Zunahme ist dabei in einer Region erhöht (■ Abb. 3.5), in der die vermutlich auch orographisch verstärkten städtischen Lee-Effekte auftreten (► Abschn. 3.3.3).

Mit dem Niederschlagstrend der Modellläufe ist eine Abnahme der Globalstrahlung in Norddeutschland verbunden, wobei die Differenz zwischen Stadt und Umland sich nicht wesentlich ändert.

3.5 Einflüsse der Stadtentwicklung auf das Stadtklima (Szenarien)

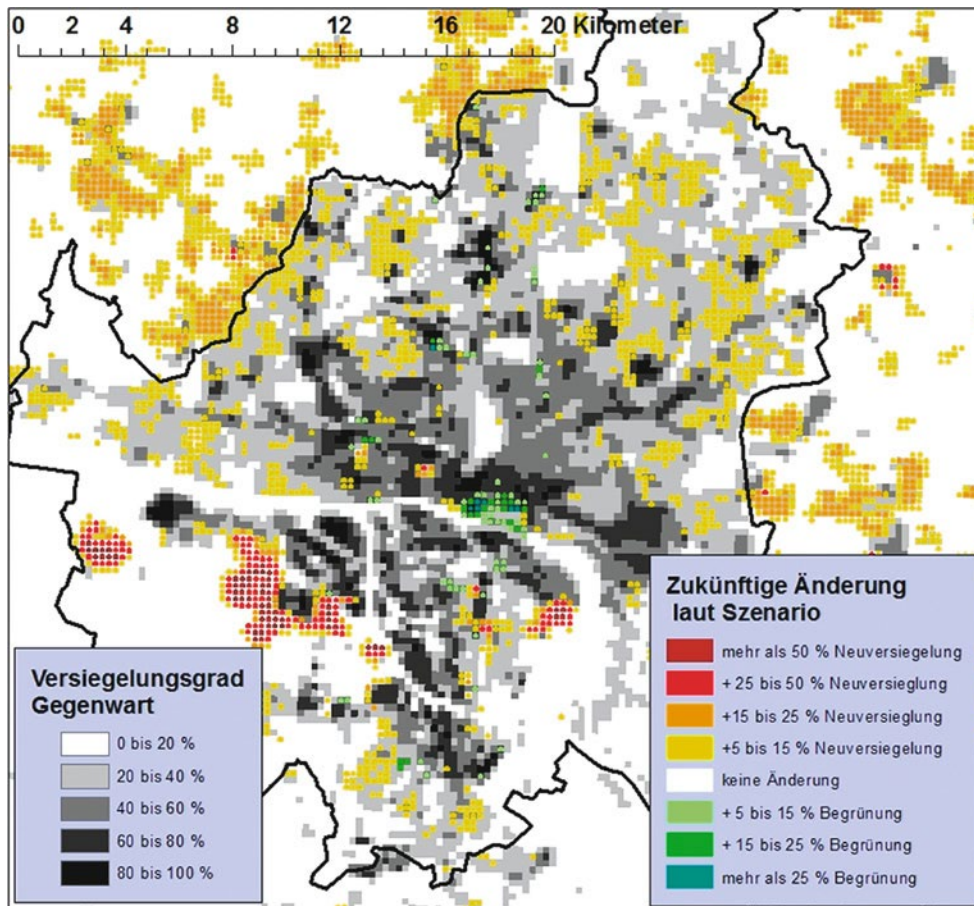
Wie bereits in ► Abschn. 3.2 ausgeführt, verändern die städtischen Gebiete das regionale Klima, indem die Stadt ihren „urbanen Fußabdruck“ in lokalen und regionalen Veränderungen des Klimas hinterlässt. Diese Auswirkungen bedeuten gleichzeitig eine Chance, die regionalen Auswirkungen des Klimawandels abzumildern – oder sie zu verstärken, wenn die falschen Maßnahmen ergriffen werden. Daher wurden in mehreren Forschungsprojekten die Auswirkungen von geplanten Änderungen in der Stadtstruktur auf das Stadtklima untersucht.

3.5.1 Stadtentwicklung und Temperatur

Trusilova und Riecke (2015) beziehen in Modellierungen bis 2030 auch Entwicklungen von Landnutzungsänderungen ein. Die den Modellierungen für Hamburg zugrunde gelegte Siedlungsentwicklung ist dabei einem BBSR-Forschungsprojekt entnommen (Teilprojekt Landnutzungsszenarien 2030 – Für eine Klimawandel

optimierte Stadtentwicklung in Deutschland), stellt also keine von der Stadt Hamburg selbst konkret geplante Entwicklung dar. Die Ergebnisse geben einen Anhalt, wie sich in Hamburg Flächenumwidmungen auf die Temperatur auswirken können. Im Szenario werden Flächen mit niedriger Vegetation in eine versiegelte, städtisch verdichtete Fläche bzw. alternativ in eine Waldfläche umgewidmet. Die Änderungen werden für eine trocken-heiße und eine regenreiche Wetterlage berechnet. Die besondere Wirkung von Straßenschluchten auf das „Einfangen“ solarer Einstrahlung und die Schattenwirkung durch Bäume werden nicht berücksichtigt. Tatsächlich bekommt die Schattenwirkung durch Bäume vor allem dann eine besondere Bedeutung, wenn in sommerlichen Dürreperioden Grünflächen einschließlich Dachbegrünungen zunehmend austrocknen und ihr abkühlender Charakter gemindert wird. Der Landnutzungswechsel „Vegetation in Stadt“ führt im Falle der trocken-heißen Verhältnisse zu allen Tageszeiten für den Bereich der umgewidmeten Fläche zu einer Temperaturzunahme von bis zu +0,5 K, während unter regenreichen Bedingungen eine Temperaturänderung zwischen –0,1 K und +0,3 K verbleibt. Hinsichtlich einer Aufforstung zeigt sich sowohl unter den sommerlich trockenen als auch bei nassen Bedingungen eine Temperaturreduktion von bis zu –0,2 K.

Die vom Bund sowie von der DFG geförderten Forschungsprojekte KLIMZUG-NORD (Endergebnisse in KLIMZUG-NORD 2014) und CliSAP (Schlünzen et al. 2009) untersuchten verschiedene Aspekte der Entwicklung Hamburgs für das sommerliche Stadtklima. Auch diese Szenarien sind wissenschaftlicher Natur und prognostizieren nicht die tatsächliche Entwicklung Hamburgs, sondern eine potenziell mögliche. In allen Szenarien ist das Wachstum Hamburgs im Wesentlichen auf die im Flächennutzungsplan (Stand 2005) ausgewiesenen Gebiete beschränkt und die Gebäudehöhe vertikal auf unter 50 m begrenzt. In der Tat sollen im Zentrum von Hamburg keine Hochhäuser gebaut werden. Insgesamt sind in den Szenarien die Änderungen der Oberflächenbedeckung relativ gering, was dem Konzept der kompakten Stadt folgt und Aspekte von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel einschließt. Mehr Begrünung (vor allem der Dächer) und erhöhte Albedo-Werte auf Dächern und anderen versiegelten Flächen, die nicht begrünt werden können (z. B. Straßen), wurden z. B. im KLIMZUG-Szenario „Wachstum der kompakten Stadt“ angenommen. Darin sowie im Szenario BSU-HH50 (■ Abb. 3.10) wurden die Aufstockung von Mehrstöckhäusern um ein Stockwerk und ein Umbau von Einzelhäusern in Doppel- oder Reihenhäuser oder deren Ersatz durch Wohnblocks angenommen. Bei all diesen Veränderungen wurde außerdem ein größerer Anteil an Begrünung mit ausschließlich intensiven Gründächern (KLIMZUG-Szenario) oder teilweise auch extensiven Gründächern (BSU-HH50-Szenario) angenommen und in der Modellierung berücksichtigt. Die Wirkung dieser Gründächer wie allgemein aller Grünflächen hängt markant von der Feuchtigkeit des Substrates bzw. der Bodenfeuchte ab. Bei den intensiven Gründächern wird eine auch in Trockenperioden ausreichende Bewässerung angenommen, bei den extensiven Gründächern wie bei allen anderen Grünflächen eine Austrocknung des Substrates berücksichtigt. Mit zunehmender Austrocknung verlieren die Grünflächen an Bedeutung für eine



■ **Abb. 3.10** Versiegelung in der Gegenwart und potenzielle Änderungen im Szenario BSU-HH50. Dachbegrünung ist in der Abbildung nicht berücksichtigt. (Teichert et al. 2014)

Temperaturreduktion, da die Verdunstung zurückgeht. Neben der Minderung hoher Tagestemperaturen kommt den Grünflächen auch eine Funktion zur Reduzierung des Staubeintrages in die Atmosphäre zu, der auch von den Feuchtigkeitsverhältnissen abhängt.

Mit dem mesoskaligen Modell METRAS (250 m Auflösung) wurden über eine statistisch-dynamische Verfeinerung diverse sommerliche meteorologische Situationen gerechnet, um klimatologisch repräsentative Werte zu erhalten. Durch ausgewählte Anpassungsmaßnahmen (Szenario KLIMZUG-NORD) kann die mittlere Sommertemperatur lokal um 0,2 K reduziert werden, wobei die stärkste Verringerung in den Bereichen liegt, in denen die Versiegelung sehr hoch ist (KLIMZUG-NORD 2014). Die Begrünung hat dabei nicht nur nachts, sondern auch tagsüber einen Einfluss. Gleichzeitig steigen die UHI-Effekte in vollständig neu bebauten Gebieten im Sommermittel um bis zu +0,2 K an (BSU-HH50 Szenario; Petrik et al. 2013). Eine Einschätzung der Wirkung der Stadtentwicklungsszenarien für den Winter steht noch aus.

Die Bedeutung von Grünflächen zur Minderung hoher Tagestemperaturen in urbanen Räumen stellen Steeneveld et al. (2011) anhand von mit Norddeutschland geografisch vergleichbaren niederländischen Siedlungsflächen nochmals deutlich heraus. In ihrem Beispiel sinkt der UHI bei einer Zunahme des Grünflächenanteils von 5 auf 55 % um etwa 2 K, bei extremer Hitze auch um mehr. Das Informationsportal KlimaAnpassung

in Städten (INKAS; Buchholz und Kossmann 2015) des Deutschen Wetterdienstes ermöglicht für den Anwender erste grobe Abschätzungen zu entsprechenden Wirkweisen. Grundlage für INKAS bilden Modellrechnungen mit dem mikroskaligen urbanen Klimamodell MUKLIMO 3. (Sievers und Zdunkowski 1986; Sievers 1990) bei 50–100 m Auflösung.

Anthropogene Wärme wurde in allen bisher in diesem Abschnitt genannten Modellstudien als unverändert angenommen. Da aufgrund des Umbaus von Häusern hin zu besserer Wärmedämmung künftig im Winter weniger Energie zum Wärmen, im Sommer weniger zum Kühlen genutzt wird, wird die anthropogene Wärmefreisetzung zukünftig geringer sein. Dies führt zu einer Verringerung des Wärmeinsel-Effekts im Sommer, da auch die in Industrie und Verkehr eingesetzte Energie voraussichtlich effektiver genutzt wird. Reduktionen sind auch im Winter gegeben; hier kann der Effekt noch größer sein, da gegenwärtig viel Energie zur Erwärmung der Gebäude genutzt wird.

3.5.2 Stadtentwicklung und Niederschläge

Für das KLIMZUG-NORD-Szenario der Stadtentwicklung wurden dessen Auswirkungen auf starke Niederschläge untersucht. Wie bereits in ► Abschn. 3.3.3 erwähnt, sind die Auswirkungen der Stadtstruktur auf Niederschlagsentstehung

und -menge gering, zumindest für Hamburg. Dies wurde auch durch die Modellrechnungen mit METRAS (Schoetter 2013) abgesichert. Dennoch stellen mehr versiegelte Flächen zusätzliche Herausforderungen für die Stadtplaner dar, da diese Oberflächen kein Wasser aufnehmen können und somit das Wasser abgeleitet werden muss, um Hochwasser durch Niederschläge zu vermeiden. Andererseits stellt das Wasser vor allem für Trockenperioden ein wichtiges Gut dar, sodass das einfache „Ableiten“ in eine „Speicherung“ des Wassers zu überführen ist (► Abschn. 3.2.8).

3.5.3 Stadtentwicklung und Wind

In Bezug auf das Windfeld sind die zu erwartenden Veränderungen lokal begrenzt; sie können in der Nähe von Bauwerken sehr groß sein (Schlünzen und Linde 2014). Auswirkungen von neuen Gebäuden auf das Windklima in einem wachsenden Vorort von Hamburg auf der großen Insel Wilhelmsburg wurden mit dem hindernisauflösenden Modell MITRAS (Schlünzen et al. 2003) mit einer Auflösung von 5 m untersucht. Auswirkungen in einer Entfernung von 1000 m von Neubauten wurden nicht nur nahe der Oberfläche, sondern auch in größerer Höhe gefunden und beeinflussen somit auch die Belüftung der Gebäude in den oberen Stockwerken (Schlünzen und Linde 2014). Einerseits könnten einige Straßen, Plätze oder sogar Balkone in oberen Stockwerken weniger nutzbar werden, da die Menschen dort hohen Windgeschwindigkeiten durch Umströmung der Neubauten ausgesetzt wären. Andererseits kann ein früher gut durchlüfteter Ort windstill werden; an einem sonnigen Tag können die Temperaturen dann lokal bis hin zu einer Hitzebelastung für die Menschen ansteigen. Weiterhin können aufgrund von Wind- und Temperaturänderungen hohe Konzentrationen an anderen Orten als zuvor entstehen, womit sich auch das Expositionsmuster ändern könnte. Auch Stadtbäume haben einen Einfluss auf das Windfeld (Salim et al. 2015), wirken aber vor allem vermindern und führen über größeren Freiflächen zu lokalen Erhöhungen (► Abschn. 3.3.2).

3.5.4 Stadtentwicklung und Klimawandel

Änderungen von Temperatur und Niederschlag, wie sie aus Stadtentwicklungsszenarien resultieren, die auf Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen zielen, können die vom Klimawandel verursachten Temperaturerhöhungen und Niederschlagsänderungen nur geringfügig reduzieren. Allerdings könnten sie in Hitzeperioden relevant werden, indem sie die Stadttemperaturen bei Nacht etwas niedriger halten. Um den kühlenden Effekt des Stadtgrüns zu sichern, muss dessen Bewässerung gewährleistet sein, z. B. durch Wasserspeicherung während Feuchteperioden. Trocknet das städtische Grün aus, geht seine kühlende Wirkung verloren. Eine besonders große Bedeutung kommt dabei den Bäumen in der Stadt zu, die nicht nur eine erhebliche Verdunstungsleistung aufweisen, sondern zudem durch ihre Schattenwirkung direkt dazu beitragen, dass sich Oberflächen weniger erwärmen.

3.6 Herausforderungen des Klimawandels und absehbarer Stadtstrukturänderungen sowie mögliche Reduktions- und Anpassungsmaßnahmen

Eine der großen Umstrukturierungsmaßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen ist die verstärkte Einführung regenerativer Energien. Auch sie greifen allerdings in den natürlichen Energiehaushalt des Erdsystems ein und können insofern Wetter und Klima beeinflussen. Boettcher et al. (2015) untersuchten den Einfluss von Offshore-Windparks in der Deutschen Bucht bei maximaler Installation und fanden selbst in der 100 km entfernten Stadt Hamburg geringe Einflüsse. So nimmt die mittlere Sommertemperatur geringfügig ab (bis zu 0,1 K), während der Wärmeinsel-Effekt geringfügig zunimmt (bis zu 0,2 K). Ursache hierfür sind vor allem Veränderungen in der Wolkenentwicklung.

Viele Städte der MRH liegen in der Nähe der Küste oder eines Flusses und müssen für Sturmfluten gerüstet sein. Dies kann durch Deiche wie z. B. in den Niederlanden oder entlang der Elbe geschehen oder auch durch Barrieren wie bei der Themse in London. All diese Maßnahmen sind teuer, aber sie schützen nicht nur wertvolle Infrastruktur, sondern retten auch Leben. Wie sich in den letzten Jahren herausstellte, werden durch Niederschläge verursachte Hinterlandüberschwemmungen zu einer immer größeren Herausforderung, und es müssen ähnliche Vorkehrungen getroffen werden wie für Sturmfluten. Während flussaufwärts (z. B. am Rhein oder oberhalb der Tideelbe) Deiche auch vor Flusshochwasser schützen und ständig verbessert und verstärkt werden, scheinen Küstenstädte keinen Fokus auf Regenereignisse zu legen, die gleichermaßen eine Herausforderung sein können. Konzepte zur Ableitung des Wassers bei Starkniederschlagsereignissen sind nötig. Methoden sind bereits vorhanden; so hat Hamburg in den letzten Jahren bereits ein separates Regenentwässerungssystem eingeführt und erhebt Extragebühren, wenn Regenwasser nicht lokal versickert.

Inzwischen sind erste Überschwemmungsgebiete nicht nur für Sturmfluten, sondern auch für durch Niederschläge bedingte hohe Wasserstände im Bereich der kleineren Flüsse Hamburgs ausgewiesen (FHH 2016a). Für intensive Niederschlagsereignisse, die in einem zukünftigen Klima zu erwarten sind (► Abschn. 2.4.2), und für erhöhte Mengen an Winterniederschlägen wird es für städtische Gebiete erforderlich sein, sich auch auf eine Wasserspeicherung über das Jahr einzustellen. Dies muss auch im Winter geschehen, um genügend Wasser für die Sommerperioden zu haben, die in einem zukünftigen Klima im Mittel wahrscheinlich trockener sein werden (► Abschn. 2.4.2). Das Wasser wird nicht nur in der gleichen Menge wie heute gebraucht, um städtische Grünflächen zu bewässern; es werden eher noch größere Mengen benötigt, und zwar aus zwei Gründen: Erstens kann die wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen, weshalb auch die Verdunstung (in Litern) höher sein wird, und zweitens erfordert mehr Stadtgrün, das helfen soll, die urbanen Temperaturen zu reduzieren, auch mehr Wasser. Begrünung von Stadtgebieten ist tatsächlich nur hilfreich, wenn das städtische Grün frisch gehalten wird und Verdunstung stattfinden kann.

Mehr versiegelte Flächen (manchmal auch zum Schutz vor Hochwasser eingesetzt, z. B. neue Deiche mit Bitumen- oder Steinabdeckung oder Wände) sollten vermieden werden, da sie die Menge der Wärmespeicherflächen und damit die Nachttemperaturen erhöhen. Auch der aktuelle Ersatz von Grünflächen und Gärten in städtischen und vorstädtischen Gebieten durch Gebäude und versiegelte Flächen (Nachverdichtung) wird zu einem Anstieg der städtischen Nachttemperaturen führen. Zudem ist die Tendenz zur Ausdehnung der Stadt in die umliegenden ländlichen Gebiete nicht gebremst. All dies wird die Überhöhung der Nachttemperaturen in den städtischen Gebieten noch verstärken und sollte durch den Erhalt und die Schaffung von möglichst vielen grünen Flächen (auch auf Dächern, dann intensive Begrünung) vermieden werden.

Höhere Temperaturen in den Städten führen zu diversen Stressfaktoren. Wärme selbst wird als gesundheitsrelevanter Faktor wahrgenommen. Morbidität und Mortalität können steigen (Scherber 2014; Scherber et al. 2013). Auch wenn im Gegenwarts-klima die gesundheitlichen Beeinträchtigungen in Hamburg noch recht gering sind, werden bei zukünftig höheren Temperaturen gesundheitliche Folgen im Sommer zu erwarten sein (vgl. ► Abschn. 8.2). Planer in der MRH sollten sicherstellen, dass bestehende städtische Grünflächen erhalten und neue geschaffen werden. Darüber hinaus sollten alle Wärmeemissionen (in die Atmosphäre und in Gewässer) vor allem im Sommer reduziert werden, um die nächtliche Wärmebelastung in städtischen Gebieten zu verringern.

Projektionen von Iamarino et al. (2011) deuten auf einen Anstieg von 16 % der anthropogenen Wärmeentwicklung aufgrund einer größeren Erwerbsbevölkerung in der Stadt London bis zum Jahr 2025 im Vergleich zu 2005 hin. Dies würde dort zu noch höheren Temperaturen im Stadtgebiet führen, wenn keine Schutzmaßnahmen ergriffen würden. An dieser Stelle wird deutlich, dass es Synergien zwischen Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen gibt: Wenn es weniger Strom verbrauchende Computer, Fabriken und Fahrzeuge gibt, werden nicht nur die CO₂-Emissionen (oder Äquivalente) und damit langfristig die globale Temperaturerhöhung begrenzt, sondern auch direkt und sehr schnell die Abwärmeemissionen in das Stadtgebiet und damit die dort vorherrschenden Temperaturen. Das Gleiche gilt für gut gedämmte Gebäude: Weniger Energie für Heizung und weniger Kühlung (Hitze von außen dringt nicht so leicht in das Gebäude) reduzieren den CO₂-Ausstoß (für die Energieproduktion). Die reduzierten CO₂-Emissionen führen zu geringerer globaler Erwärmung in der Zukunft, während die bessere Wärmedämmung jetzt und in der Zukunft zu einer reduzierten Wärmeinsel führt. Unklar ist bei der veränderten Isolierung aber noch im Detail, wie sich die Energiebilanz der Stadt dadurch verändern wird und ob durch die verminderte Wärmeaufnahme tagsüber nicht die Tagestemperaturen ansteigen könnten.

Die zu erwartenden höheren Temperaturen könnten zu höheren biogenen VOC-Emissionen aus der Vegetation führen, die schließlich die Ozonwerte ansteigen lassen, wenn die NO_x-Emissionen nicht wesentlich reduziert werden (Meyer und Schlünzen 2011). Um zusätzliche organische Emissionen als Vorläufergase für die Ozonproduktion zu vermeiden, muss neues städtisches Grün so gewählt werden, dass sein VOC-Emissionspotenzial gering ist (Kuttler 2013, S. 281).

Aufgrund der vermutlich steigenden Sommertrockenheit können mehr Partikel von trockenen Oberflächen abgetragen

werden, was die ohnehin schon hohe Partikelbelastung in städtischen Gebieten noch weiter erhöht. Dies ist ein weiteres Argument für die Bepflanzung (oder natürliche Begrünung) von möglichst vielen Flächen in städtischen Gebieten und deren Wasserversorgung in Trockenperioden, sodass die Erosion so gering wie möglich bleibt. Hier nachhaltig voranzukommen bedeutet für die Zukunft, den Weg der Emissionsminderung – sei es durch technische Lösungen (z. B. andere Kfz-Antriebssysteme) oder durch andere Mobilitätskonzepte – konsequent fortzusetzen. Andere Sofortmaßnahmen zur Reduzierung der PM-Werte (z. B. Befeuchtung von Straßenoberflächen) helfen meist nur kurzfristig und sind mit hohen Kosten verbunden und so als eher nicht effektiv anzusehen.

3.7 Schlussbemerkungen

Städtische Gebiete sind nicht nur von regionalen Klimaänderungen betroffen, sondern tragen auch selbst mit ihren hohen Emissionen und Veränderungen der Oberflächen zu Modifikationen des regionalen Klimas bei. Dadurch hinterlassen sie ihren eigenen städtischen Fußabdruck. Dies wird vor allem durch Konzentrationen oberhalb der EU-Grenzwerte für NO_x (gelegentlich Tagesmittelwert überschritten), NO₂ (Jahresmittelwert) und Partikel (gelegentlich PM10-Tagesmittelwerte überschritten) deutlich. Aufgrund der Stadtstrukturen, der Veränderungen im Oberflächenenergiehaushalt und zusätzlicher Emission von anthropogener Wärme herrschen in städtischen Gebieten bodennah höhere Lufttemperaturen, besonders bei Nacht. Die Werte können sich im Bereich von ein paar Grad im Monatsmittel bewegen und erreichen Werte von ca. 7 K in besonders ungünstigen autochthonen Wetterlagen (klarer Himmel, hohe Strahlungswirkung, niedrige großskalige Druckgradienten).

Auch wenn die für Hamburg gefundenen Stadtklimaergebnisse auf andere Städte der Metropolregion näherungsweise übertragbar sind, bestehen doch Unterschiede zwischen den Städten der MRH in Bezug auf den Stadtplanungsbedarf. Während einige Bereiche in den Jahren 2011–2013 gewachsen sind (z. B. Hamburg und Landkreise Harburg, Stormarn), verändern sich andere wenig in Bezug auf die Zahl der Einwohner, wachsen aber hinsichtlich Wohnraumbedarf; in anderen Regionen nimmt die Einwohnerzahl ab (z. B. Uelzen, Cuxhaven, Lüchow-Dannenberg). Die Folgen des Klimawandels werden immer deutlicher; erste Hinweise darauf, was Mitte bis Ende des Jahrhunderts kommen wird, sind z. B. Hinterlandüberschwemmungen, intensiverer Niederschlag, sehr trockene und warme Sommerperioden. Da auch eine sich nicht verändernde Stadt Einwohner hat, die Gebäude renovieren, und junge Menschen, die neue Infrastrukturen und neue Technologien nutzen, welche eines Tages Standard für alle sein werden, gibt es eine Chance, die Städte kontinuierlich an den kommenden Klimawandel anzupassen und gleichzeitig Emissionen zu reduzieren. Die schlimmsten Auswirkungen des Klimawandels können mittels gut durchdachter und vorab in der Wirkung eingeschätzter Anpassungsmaßnahmen vermindert werden.

Damit Maßnahmen in ihrer Wirkung besser eingeschätzt werden können, soll an dieser Stelle auch noch einmal darauf hingewiesen werden, wo Unsicherheiten bestehen oder noch

weitere wissenschaftliche Untersuchungen erforderlich sind. Das regionale, das Stadtklima beeinflussende Klimasignal hängt von den globalen Veränderungen ab. Je nachdem, welche Emissionsreduktionen dort erfolgen, können die in diesem Kapitel analysierten Signale stärker ausfallen (ohne Emissionsreduktion) oder auch etwas schwächer (globaler Temperaturanstieg unter 2 K). Die Analysen hier beziehen sich auf das A1B-Szenario (in der regionalen Wirkung vergleichbar mit RCP4.5). Wie in ► Abschn. 2.4.1 ausgeführt, haben alle Szenarien eine Bandbreite; hier sind eher mittlere Veränderungen betrachtet worden. Zukünftig sollten auch für regionale und stadtklimatische Untersuchungen nicht nur mittlere Veränderungen, sondern auch die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse betrachtet werden.

Fast alle hier gezeigten Analysen beziehen sich auf den Sommer. Eine Einschätzung der Wirkung insbesondere der im Sommer positiv das Stadtklima beeinflussenden Stadtentwicklungsszenarien für den Winter steht ebenso aus wie Einschätzungen in den Übergangsjahreszeiten. Hier wurden auch noch keine Wechselwirkungen untersucht, z. B. von verfrühter Pollenblüte in der Stadt auf Partikelbelastung und Gesundheit.

Die hier aufgeführten Ergebnisse beruhen ganz wesentlich auf meteorologischen Grundgrößen (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschlag). In Hinblick auf die menschliche Gesundheit sind hieraus abgeleitete Größen relevant. Für Innen- und Außenräume müssen die geeigneten Indizes aus einer großen Auswahl gewählt und errechnet werden (z. B. gefühlte Temperatur und weitere über 100 Indizes; de Freitas und Grigorieva 2015), auch hinsichtlich der Zusammenhänge mit gesundheitlichen Wirkungen. Dabei gilt es, Unsicherheiten der Eingabegrößen in Hinblick auf die klimatischen Parameter ebenso zu berücksichtigen wie die Aufenthaltsorte der Menschen zu integrieren. Weiterhin reagiert der Mensch altersabhängig unterschiedlich auf seine klimatischen Umgebungseinflüsse. Damit hier Fortschritte erzielt werden, müssen die meteorologischen Informationen auch zwischen und in den Häusern einbezogen werden. Hier sind noch Weiterentwicklungen bestehender Methoden und Modelle nötig, um flächendeckend für Städte auch zwischen Gebäuden alle meteorologischen Parameter und daraus abgeleitete Indizes berechnen zu können, wie es für Luftbelastungen bereits auf Stadtteile bezogen möglich ist (■ Abb. 3.9). Vegetationseffekte sind dabei nicht nur in Hinblick auf das Windfeld und Abschattungen zu berücksichtigen, sondern auch in Hinblick auf mögliche Emissionen und Ablagerungen für Partikel und Gase.

Die größten Unsicherheiten bei den meteorologischen Parametern bestehen gegenwärtig in Bezug auf Niederschläge. Dieses gilt für das regionale Klimasignal, wo zwar eine winterliche Niederschlagszunahme angenommen werden kann, von einer sommerlichen Niederschlagsabnahme aber ebenso wenig sicher für die Zukunft ausgegangen werden kann wie von einer Zunahme. Daher muss gegenwärtig bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen mit beidem gerechnet werden. Zudem müssen sehr lange Mittelungszeiträume betrachtet werden (wenigstens 30 Jahre), um zu signifikanten Aussagen zu kommen.

Auch der Stadteffekt auf den Niederschlag ist unsicher; er wird für unterschiedliche Städte verschieden gefunden. Während oftmals eine Lee-Intensivierung attestiert wurde (diese ist auch für Hamburg bei vielen Windrichtungen gefunden worden), so ist die Stadt nicht allein ursächlich hierfür. Han et al.

(2014) weisen auf den zusätzlichen Orographieeinfluss hin. Auch für Hamburg scheinen die Hügel der Umgebung Aufstiegs- und Absinkprozesse zu induzieren, die stärker als der Stadteffekt sind. Diese Hypothese muss sowohl für Szenarien im Ist-Klima als auch für das Zukunftsklima weiter geprüft werden, insbesondere im Zusammenspiel mit der Gebäudehöhe. Sollten hohe Gebäude erheblichen Einfluss auf Niederschläge haben, so muss dieses bei der Stadtplanung berücksichtigt werden können. Der zusätzliche Effekt von anthropogenen Aerosolen auf den Niederschlag wurde in der MRH bisher noch nicht untersucht. Er ist in Hinblick auf Trendanalysen im Niederschlag und in Anbetracht der Emissionsentwicklungen mit anderer Zusammensetzung der Aerosole erforderlich, um dadurch bedingte lokal induzierte Veränderungen in Niederschlagsmengen und Niederschlagsmustern einschätzen zu können. Schließlich hängen Niederschläge auch von der Verdunstung ab, die innerhalb von Städten in verschiedenen Höhen stattfindet und von der Wasserverfügbarkeit abhängt. Um hier zu belastbareren Aussagen zu kommen, müssen die meteorologischen Modelle mit Grundwassermodellen verbunden werden.

Auch wenn noch Forschungsbedarf im Zusammenhang mit Stadtklima, Stadtentwicklung, Klimawandel und den jeweiligen Auswirkungen besteht, zeigen die bisherigen Erkenntnisse, dass es notwendig ist, die bekannten Einflüsse bereits heute angemessen in stadtplanerische Maßnahmen einzubeziehen.

Literatur

- Armstrong BG, Chalabi Z, Fenn B, Hajat S, Kovats S, Milojevic A, Wilkinson P (2011) Association of mortality with high temperatures in a temperature climate: England and Wales. *J Epidemiol Community Health* 65:340–345
- Arnds D, Böhner J, Bechtel B (2015) Spatio-temporal variance and meteorological drivers of the urban heat island in a European city. *Theor Appl Clim* 128:43
- Augter G (1997) Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst, interne Ausarbeitung, unveröffentlicht
- Barlag A-B, Kuttler W (1991) The significance of country breezes for urban planning. *Energy Build* 15(1):291–297
- Bechtel B, Schmidt KJ (2011) Floristic mapping data as a proxy for the mean urban heat island. *Clim Res* 49:45–58
- Bechtel B, Wiesner S, Zakšek K (2014) Estimation of dense time series of urban air temperatures from multitemporal geostationary satellite data. *IEEE JSTARS* 7(10):4129–4137
- Behrens K (1998) Die atmosphärische Trübung in Potsdam. *Ann Meteorol* 37(1):113–114
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2006) Szenarien der Mobilitätsentwicklung unter Berücksichtigung von Siedlungsstrukturen bis 2050. Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, unter FE-Nr. 070.757/2004 (FOPS) – Abschlussbericht (Webseiten des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI))
- Bohnenstengel SI, Hamilton I, Davies M, Belcher SE (2014) Impact of anthropogenic heat emissions on London's temperatures. *Q J R Meteor Soc* 140:687–698
- Boettcher M, Hoffmann P, Lenhart H-J, Schlünzen KH, Schoetter R (2015) Influence of large offshore wind farms on North German climate. *Meteorol Z* 24(5):465–480
- Böhm J, Wahler G (2012) Luftreinhalteplan für Hamburg. 1. Fortschreibung 2012. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Amt für Immissionsschutz und Betriebe, Hamburg. <http://www.hamburg.de/contentblob/3744850/f3984556074bbb1e95201d67d8085d22/data/fortschreibung-luftreinhalteplan.pdf>. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017

- Brümmer B, Lange I, Konow H (2012) Atmospheric boundary layer measurements at the 280 m high Hamburg weather mast 1995–2011: mean annual and diurnal cycles. *Meteorol Z* 21(4):319–335
- Buchholz S, Kossmann M (2015) Research note. Visualisation of summer heat intensity for different settlement types and varying surface fraction partitioning. *Landsc Urban Plan* 144:59–64
- Crosman ET, Horel JD (2010) Sea and lake breezes: a review of numerical studies. *Bound Layer Meteor* 137:1–29
- Dauer U, Feigenspan S, Minkos A, Langner M (2015) Luftqualität 2014 – Vorläufige Auswertung. Umweltbundesamt, Dessau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2014>. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- De Freitas CR, Grigorjeva EA (2015) A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *Int J Biometeorol* 59(1):109–120
- De Ridder K, Lauwaet D, Maiheu B (2015) UrbClim – A fast urban boundary layer climate model. *Urban Clim* 12:21–48
- Dudenhöfer F (2004) Die Langfrist-Entwicklung des Automobilmarktes in Deutschland. *Jahrb Absatz Verbrauchsforsch* 50(3):62–275
- Ertl G (2010) Charakteristika und Repräsentativität von Niederschlag in Norddeutschland. Diplomarbeit im Fach Meteorologie, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg
- FHH (2008) Strategischer Lärmaktionsplan Hamburg. Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg. <http://www.hamburg.de/contentblob/914000/efd38637d37b64cc85144c5741c92db3/data/strategischer-lap.pdf>. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- FHH (2013) Lärmaktionsplan Hamburg 2013 (Stufe 2). Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg. <http://www.hamburg.de/contentblob/4088786/data/laermaktionsplan-hamburg-2013.pdf>. Zuletzt zugegriffen 28.08.2017
- FHH (2016a) Überschwemmungsgebiete in Hamburg – Leitfaden. Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie, Hamburg. <http://www.hamburg.de/ueberschwemmungsgebiete>. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- FHH (2016b) Hamburger Luftmessnetz. Messkomponente – NO₂. <http://luft.hamburg.de/clp/schadstoffe/clp1/clp1/>. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- Gabriel K, Endlicher W (2011) Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environ Pollut* 159(8–9):2044–2050
- GEONET (2012) Stadtklimatische Bestandsaufnahme und -bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg, Klimaanalyse und Klimawandelszenario 2050 (Untersuchung f. die Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt). <http://www.hamburg.de/contentblob/3519382/b3ca0bd3483c0397fdf1a87ce4e1846a/data/gutachten-stadtklima.pdf>. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- Gerth W-P, Christoffer J (1994) Windkarten von Deutschland. *Meteorol Z* 3:67–77
- Gerth W-P, Riecke W (1999) Klimauntersuchung für die Freie und Hansestadt Hamburg. Amtliches Gutachten des Deutschen Wetterdienstes für die Stadtentwicklungsbehörde Hamburg, interner Bericht
- Grawe D, Flagg DD, Daneke C, Schlünzen KH (2013) The urban climate of Hamburg for a 2K warming scenario considering urban development. Presentation at EMS 2013 in Reading, 13.09.2013
- Han J-Y, Baik J-J, Lee H (2014) Review: Urban impacts on precipitation. *Asia-pac J Atmos Sci* 50(1):17–30
- Heinrichs E, Leben J, Straubinger A, Cancik P (2015) TUNE ULR Technisch wissenschaftliche Unterstützung bei der Novellierung der EU-Umgebungs-lärmrichtlinie. Arbeitspaket 3: Ruhige Gebiete. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3712 55 101, TEXTE 74/2015. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_33_2015_tune_url_0.pdf. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- Heudorf U, Meyer C (2005) Gesundheitliche Auswirkungen extremer Hitze – am Beispiel der Hitzewelle und der Mortalität in Frankfurt am Main im August 2003. *Gesundheitswesen* 67:369–374
- Hoffmann P (2012) Quantifying the influence of climate change on the urban heat island of Hamburg using different downscaling methods. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Univ. Hamburg
- Hoffmann P, Schlünzen KH (2010) Das Hamburger Klima. In: Poppendieck H-H, Bertram H, Brandt I, Engelschall B, von Prondzinski J (Hrsg) *Hamburger Pflanzenatlas von A bis Z*. Dölling & Galitz, München, Hamburg
- Hoffmann P, Schlünzen KH (2013) Weather pattern classification to represent the urban heat island in present and future climate. *J Appl Meteorol Clim* 52:2699–2714
- Hoffmann P, Krueger O, Schlünzen KH (2012) A statistical model for the urban heat island and its application to a climate change scenario. *Int J Climatol* 32:1238–1248
- Hoffmann P, Schoetter R, Schlünzen KH (2016) Statistical-dynamical downscaling of the urban heat island in Hamburg, Germany. *Meteorol Z*, PrePub. <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0773>
- Iamarino M, Beevers S, Grimmond CSB (2011) High-resolution (space, time) anthropogenic heat emissions: London 1970–2025. *Int J Climatol* 32:1754–1767
- Jalkanen L (2011) WMO addressing climate and air quality. Technical Workshop on Science and Policy of Short-lived Climate Forcers, Mexico City, 9.–10. September 2011. [http://www.mce2.org/SLCFWorkshop/docs/\(Jalkanen\)%20SLCF%20Mexico%20WMO.pdf](http://www.mce2.org/SLCFWorkshop/docs/(Jalkanen)%20SLCF%20Mexico%20WMO.pdf). Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- Kaminski U (2014) Zukünftige Wetterlagen und ihr Einfluss auf die Staubkonzentrationen (PM10, PM2,5 und PM10-2,5). DWD, interne Untersuchung, unveröffentlicht
- KLIMZUG-NORD Verbund (2014) Kursbuch Klimaanpassung. Handlungsoptionen für die Metropolregion Hamburg. TuTech, Hamburg. <http://klimzug-nord.de/file.php/2014-03-20-KLIMZUG-NORD-Verbund-Hrsg.-2014-Kursbuch-Klimaanpassung>. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- Kuttler W (2013) *Klimatologie*, 2. Aufl. UTB-Bd 3099. Schöningh, Paderborn
- Landsberg HE (1981) *The urban climate*. International Geophysics Series 28. Academic Press, New York
- Metropolregion (2009) *Metropolregion Hamburg – Fakten und Beispiele aus der Regionalkooperation*. Geschäftsstelle der Metropolregion Hamburg. Zugegriffen: 18. März 2017 (Webseite der Metropolregion Hamburg)
- Meyer EMI, Schlünzen KH (2011) The influence of emission changes on ozone concentrations and nitrogen deposition into the southern North Sea. *Meteorol Z* 20(1):75–84
- Miegel K, Mehl D, Malitz G, Ertel H (2014) Ungewöhnliche Niederschlagsereignisse im Sommer 2011 in Mecklenburg-Vorpommern und ihre hydrologischen Folgen – Teil 1: hydrometeorologische Bewertung des Geschehens. *Hydrol Wasserbewirtsch (hywa)* 58(1):18–28
- Mosimann T, Trute P, Frey T (1999) *Schutzgut Klima/Luft in der Landesplanung*. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen Heft 4/99.
- Oke TR (1982) The energetic basis of the urban heat island. *Q J R Met Soc* 108:1–24
- Pagenkopf A (2011) *Urbane Niederschlagsbeeinflussung – Genese und räumliche Differenzierung am Beispiel von Berlin*. Dissertation. Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin
- Parlow E, Vogt R, Feigenwinter C (2014) The urban heat island of Basel – seen from different perspectives. *Erde* 145:96–110
- de Paus T, Riecke W, Rosenhagen G, Tinz B (2011) Meteorologische Referenzdaten für die Metropolregion Hamburg, Klimzug-Nord, Projekt des Monats August 2011. Zugegriffen: 18. März 2017 (Webseite von Klimzug-Nord)
- Petrik R, Grawe D, Schlünzen KH (2013) *Machbarkeitsstudie Modellierung von Stadtklima – Abschlussbericht für Teil 2a: Modellrechnungen zur Ermittlung des Einflusses von städtebaulichen Maßnahmen (Dachbegrünung und allgemeine Oberflächenänderungen)*. Meteorologisches Institut, Universität Hamburg
- Pielke RA, Adegoke J, Beltran-Przekurat A, Hiemstra CA, Lin J, Nair US, Niyogi D, Nobis TE (2007) An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall. *Tellus B* 59:587–601
- Ptak D, Grothues E, Köllner B, Halbig G, Kessler-Lauterkorn T (2013) *Klimawandelgerechte Metropole Köln, Abschlussbericht*. LANUV-Fachbericht 50. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen
- Rechid D, Petersen J, Schoetter R, Jacob D (2014) *Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg*. Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten, Bd. 1. TuTech, Hamburg. <http://klimzug-nord.de/file.php/2014-03-25-Rechid-D.-Petersen-J.-Schoetter-R.-Jacob-D.-2014-Klim>. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- Richard J, Mazur H, Lauenstein D (2015) *Handbuch Lärmaktionspläne*. Handlungsempfehlungen für eine lärmindernde Verkehrsplanung. Umweltbundesamt Texte 81/2015. UBA, Dessau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_81_2015_handbuch_laermaktionsplaene.pdf. Zuletzt zugegriffen am 28.08.2017
- Richter M, Deppisch S, von Storch H (2013) Observed changes in long-term climatic conditions and inner-regional differences in urban regions of the Baltic Sea coast. *Atmos Climate Sci* 3:165–176

Literatur

- Salim MMH, Schlünzen KH, Grawe D (2015) Including trees in the numerical simulations of wind flow in urban areas: should we care? *J Wind Eng Ind Aerodyn* 144:84–95
- Schatzmann M, Bächlin W, Emeis S, Kühlwein J, Leitl B, Müller WJ, Schäfer K, Schlünzen H (2006) Development and validation of tools for the implementation of European air quality policy in Germany (Project VALIUM). *Atmos Chem Phys* 6:3077–3083
- Scherber K (2014) Auswirkungen von Wärme- und Luftschadstoffbelastungen auf vollstationäre Patientenaufnahmen und Sterbefälle im Krankenhaus während Sommermonaten in Berlin und Brandenburg. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II. Zugriffen: 18. März 2017 (Webseite der Humboldt-Universität Berlin)
- Scherber K, Langner M, Endlicher W (2013) Spatial analysis of hospital admissions for respiratory diseases during summer months in Berlin taking bioclimatic and socio-economic aspects into account. *Erde* 144:217–237
- Scherer D (2007) Viele kleine Parks verbessern das Stadtklima (Webseiten von ScienceTicker)
- Schlünzen KH (1990) Numerical studies on the inland penetration of sea breeze fronts at a coastline with tidally flooded mudflats. *Beitr Phys Atmosph* 63:243–256
- Schlünzen KH, Linde M (Hrsg) (2014) Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und mögliche Veränderungen. Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten, Bd. 4. TuTech, Hamburg. <http://klimzug-nord.de/file.php/2014-09-11-Schlunzen-K.-H.-Linde-M.-Hrsg.-2014-Wilhelmsburg-im-> Zuletzt zugriffen am 28.08.2017
- Schlünzen KH, Hinneburg D, Knoth O, Lambrecht M, Leitl B, Lopez S, Lüpkes C, Pankus H, Renner E, Schatzmann M, Schoenemeyer T, Trepte S, Wolke R (2003) Flow and transport in the obstacle layer – First results of the micro-scale model MITRAS. *J Atmos Chem* 44:113–130
- Schlünzen KH, Ament F, Bechtel B, Böhner J, Eschenbach A, Fock B, Hoffmann P, Kirschner P, Leitl B, Oßenbrügge J, Rosenhagen G, Schatzmann M (2009) Development of mitigation measures for the metropolitan region of Hamburg (Germany). *Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 6 332034
- Schlünzen KH, Hoffmann P, Rosenhagen G, Riecke W (2010) Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. *Int J Climatol* 30:1121–1136
- Schlünzen KH, Ries H, Kirschner P, Grawe D (2011) Machbarkeitsstudie Modellierung von Stadtklima: Bewertung etablierter Methoden zur Einschätzung des Stadtklimas und Nutzung der vielfältigen Informationen zu vorhandenen Flächennutzungen für numerische Modelle. Meteorologisches Institut, Universität Hamburg. Zugriffen: 18. März 2017 (Webseite Universität Hamburg)
- Schoetter R (2013) Can local adaptation measures compensate for regional climate change in Hamburg Metropolitan Region. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg
- Schoetter R, Grawe D, Hoffmann P, Kirschner P, Grätz A, Schlünzen KH (2013) Impact of local adaptation measures and regional climate change on perceived temperature. *Meteorol Z* 22:117–130
- Schümann M, Neus H, Ollroge I, Reich T (2007) Abschätzung der gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen. Stadtbericht Hamburg. EU-Projekt: ENHIS-1: WP5 Health Impact Assessment. Hamburg. <http://www.hamburg.de/contentblob/122188/90a8b9503f50117245ef1b3d4ff04c29/data/apeis-bericht-englisch.pdf;jsessionid=E032AEAB5B60C5B12D1E234DA2CD8644.liveWorker2>. Zuletzt zugriffen am 28.08.2017
- Schütz L, Kandler K (2006) Transport und Verteilung des atmosphärischen Aerosols über dem Rhein-Main-Gebiet. *Mainz Naturwiss Arch* 44:29–51
- Seidel J, Ketzler G, Bechtel B, Thies B, Philipp A, Böhner J, Egli S, Eisele M, Herma F, Langkamp T, Petersen E, Sachsen T, Schlabing D, Schneider C (2016) Mobile measurement techniques for local and micro-scale studies in urban and topo-climatology. *Erde* 147(1):15–39
- Sievers U (1990) Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. *Umweltmeteorologie, Schriftenreihe, Bd. 15. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf*, S 92–105
- Sievers U, Zdunkowski W (1986) A microscale urban climate model. *Beitr Phys Atmosph* 59:13–40
- Shepherd JM, Pierce H, Negri AJ (2002) Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *J Appl Meteor* 41:689–701
- Sonderaufgabenbereich Tideelbe der Länder Hamburg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein (Hrsg) (2008) Wärmelastplan für die Tideelbe. Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein, Flintbek. <https://www.kuestendaten.de/publikationen/Datencontainer/P/08WaermelastplanTideelbe.pdf>. Zuletzt zugriffen am 28.08.2017
- Steenefeld GJ, Koopmans S, Heusinkveld BG, van Hove LWA, Holtslag AAM (2011) Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *J Geophys Res* 116. D20129, <https://doi.org/10.1029/2011JD015988>
- von Storch H, Clausen M (2011) Klimabericht für die Metropolregion Hamburg. Springer, Berlin
- Teichert N (2013) Analyse von Oberflächeneinflüssen auf die sommerlichen Temperaturen in der Metropolregion Hamburg unter Anwendung eines GIS. Diploma Thesis Meteorology, Fachber. Geowissenschaften, Univ. Hamburg, S 113
- Teichert N, Petrik R, Schlünzen KH, Grawe D (2014) Machbarkeitsstudie Modellierung von Stadtklima – Abschlussbericht für Projektteil 2b: Darstellung von Ergebnissen für stadtplanerische Anwendungen im Stadtklima Tool. Meteorologisches Institut, Universität Hamburg, Hamburg
- Trusilova K, Riecke W (2015) Klimauntersuchung für die Metropolregion Hamburg zur Entwicklung verschiedener meteorologischer Parameter bis zum Jahr 2050. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 247. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main
- UBA (2016) Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2014 (Stand 03/2016). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (Webseiten des Umweltbundesamtes)
- UN (2012) World urbanization prospects: the 2011 revision. CD-ROM edition - data in digital form (POP/DB/WUP/Rev.2011), United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (Webseiten der UN)
- Wagner P, Kuttler W (2014) Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere – A case study in Essen, Germany. *Sci Total Environ* 475:104–115
- Wienert U, Kreienkamp F, Spekat A, Enke W (2013) A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for simulation of the thermal behavior of buildings. *Meteorol Z* 22(2):179–185
- Wiesner S, Eschenbach A, Ament F (2014) Urban air temperature anomalies and their relation to soil moisture observed in the city of Hamburg. *Meteorol Z* 23(2):143–157
- Zhang J, Rao ST (1999) The role of vertical mixing in the temporal evolution of the ground-level ozone concentrations. *J Appl Meteor* 38:1674–1691

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die nicht-kommerzielle Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist auch für die oben aufgeführten nicht-kommerziellen Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

