

Städte im Klimawandel

LOZAN, J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRASSL, D. KASANG & A. MATZARAKIS

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

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

Der städtische Wärmeinseleffekt

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

Wärmefreisetzung sind sehr unterschiedlich. Beton hat eine etwa 10× höhere Wärmeleitfähigkeit und 1,5× höhere Wärmekapazität als Ziegelsteine.

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

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

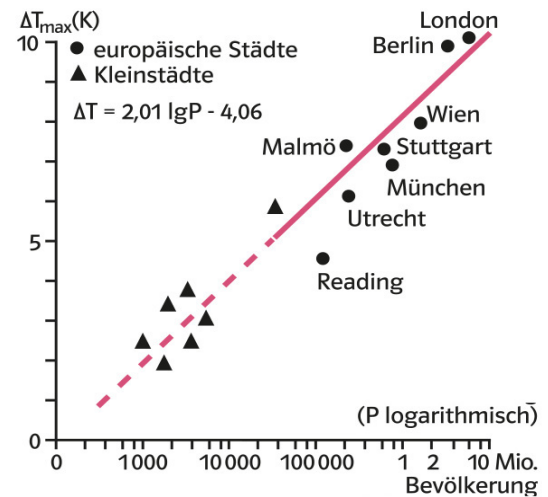


Abb. 2: Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland in europäischen Städten. Je größer die Stadt, desto größer der Unterschied (aus: MVI: Städtebauliche Klimafibel. Stuttgart 2012; *Boundary layer climates* (Second edition). By T. R. OKE. Methuen. 1987).

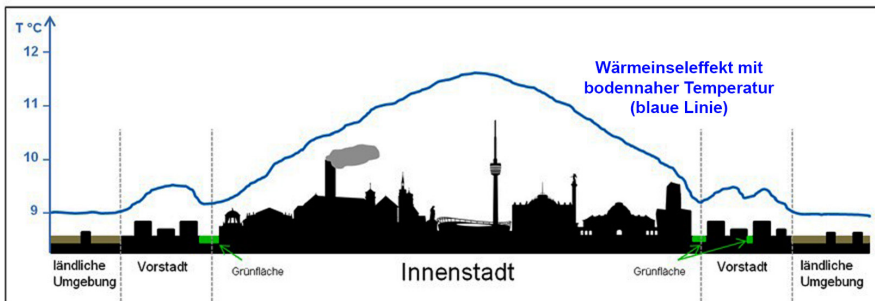


Abb. 1: Schematische Darstellung des städtischen Wärmeinseleffekts mit der bodennahen Temperatur (blaue Linie). Quelle: Stadt Stuttgart (mit freundlicher Genehmigung der Stuttgarter Behörde).

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

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

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

Temperaturentwicklung in großen Städten

In sehr großen Städten ab 5 Mio. Einwohnern haben sich die höchsten Jahrestemperaturen in den letzten 50 bzw. 30 Jahren deutlich stärker erhöht als in den Regionen, in denen die Städte liegen (PAPALEXIOU 2018).

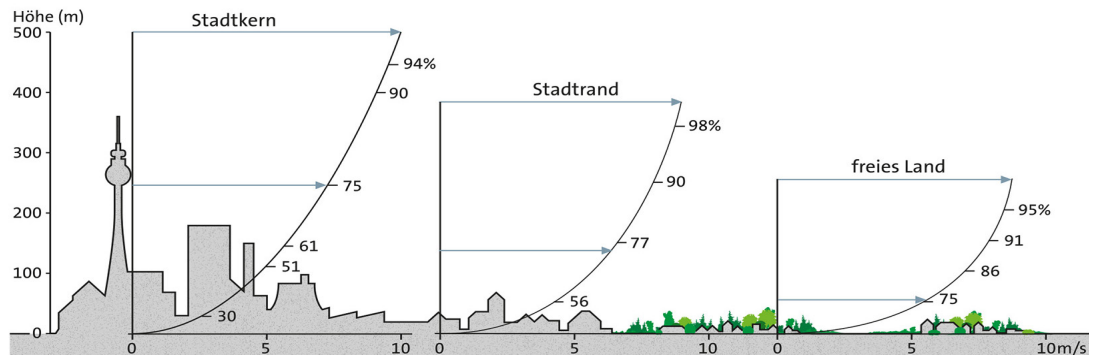


Abb. 3: Abnahme der Windgeschwindigkeit vom Stadtrand zum Stadtkern aufgrund der Bodenrauigkeiten. Über dem Kern größerer Städte wird die Geschwindigkeit der freien Strömung erst in einigen hundert Metern Höhe erreicht (bei diesem Beispiel 90% der freien Windgeschwindigkeit in ca. 400 m. (Aus: BAUMBACH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

Paris, Houston, Moskau und Harbin weisen z.B. einen Anstieg von fast 1 °C pro Jahrzehnt auf (Abb. 4), während die mittlere globale Zunahme bei nur 0,2 °C/Jahrzehnt lag. Als eine wichtige Ursache wird der städtische Wärmeinseleffekt angenommen, der besonders nachts zu ca. 1,2-4,0 °C höheren Temperaturminima führt. Schon bei einer weiteren globalen Erwärmung um 1,5 °C würden um 2050 doppelt so viele Megastädte und 350 Mio. Menschen mehr als heute extremer Hitze ausgesetzt sein. Eine außergewöhnliche Hitzewelle, wie sie Karatschi und Kalkutta 2015 erfahren haben, könnte bei einer mittleren Erwärmung um 2 °C dort sogar jährlich auftreten (WBGU 2016).

Hohe Sterblichkeit durch Hitzewelle

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

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

Städte an der Grenze der Bewohnbarkeit

Im Nahen Osten herrschen im Sommer sehr hohe mittlere Tagestemperaturen. Für den Zeitraum 2010 bis 2018 lagen in einigen Städten die mittleren Tagestemperaturen im Sommer im Bereich um

43 °C (z.B. Mogayra, Saudi-Arabien; Kuwait City und Jahra, Kuwait; Nasiriya, Irak; Minab, Iran). Auch Temperaturen über 50 °C kommen vor, wie z.B. am 29. Juni 2017 in Ahwaz (Iran) mit einer Tageshöchsttemperatur von 53,7 °C (NOAA National Climatic Data Center 2018) oder am folgenden

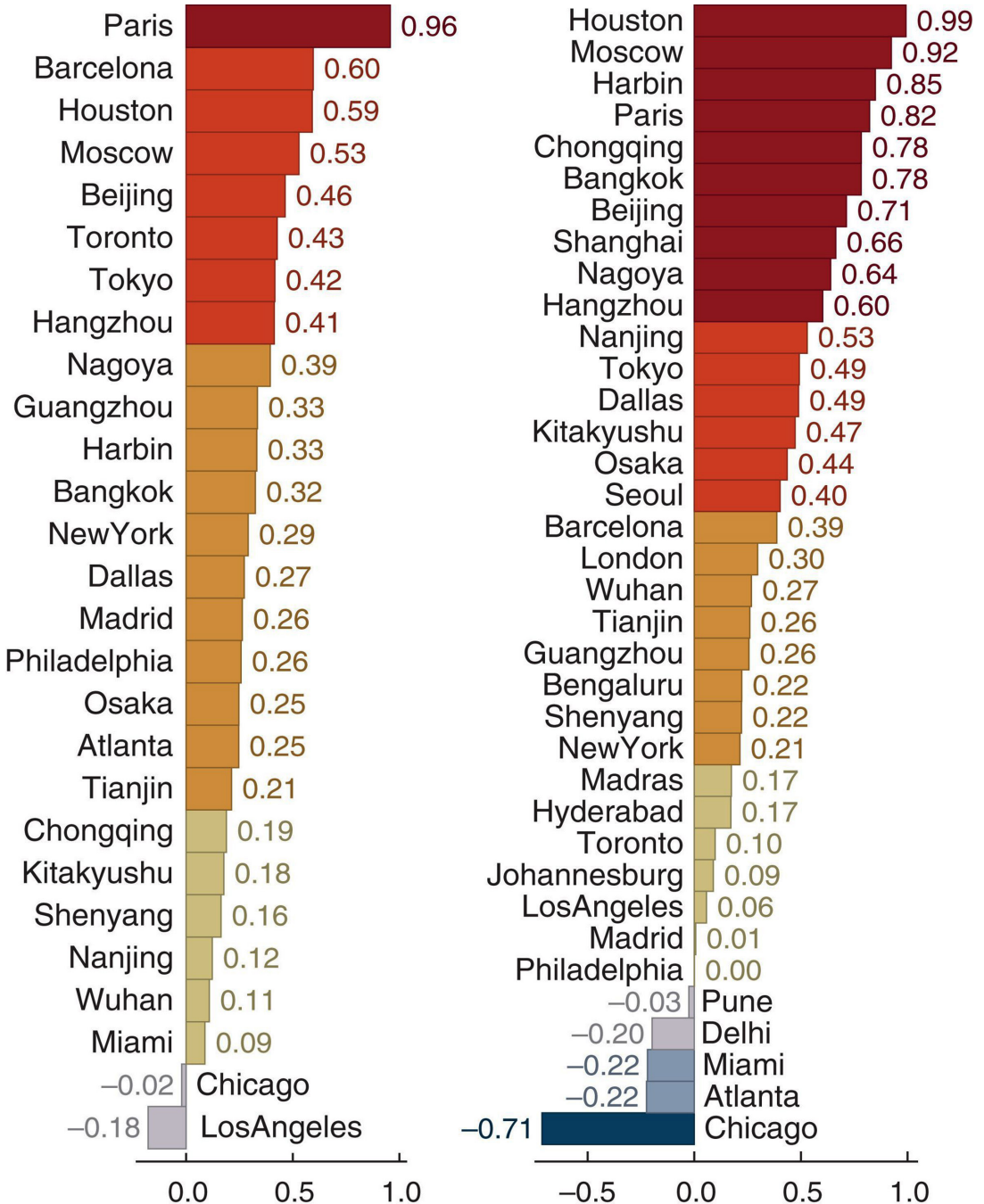


Abb. 4: Trends der höchsten Jahrestemperatur in großen Städten ab 5 Mio. Einwohnern in °C pro Jahrzehnt für die beiden Perioden 1966-2015 (links) und 1986-2015 (rechts) (PAPALEXIOU et al. 2018, Lizenz: CC BY-NC-ND).

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

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

Gesundheitsrisiken durch Luftverunreinigung

Mit der zusätzlichen Wärmebelastung und der beobachteten höheren Luftverunreinigung in Städten (Abb. 5) potenziert sich die Beeinträchtigung der Gesundheit des Menschen. Das ist eines der wichtigsten urbanen Umweltprobleme weltweit. Hohe Temperaturen treten meist bei einer austauscharmen Witterungsperiode mit Windschwäche auf. Aufgrund der oft gleichzeitig herrschenden Wolkenlosigkeit wird durch die dann hohe Ultraviolett-Strahlung und die hohe Luftverunreinigung die photochemische Ozonproduktion angeregt. Zu diesen chemischen Umwandlungen kommt eine intensivierete Pollenproduktion bestimmter Pflanzen hinzu, die noch dazu durch erhöhte CO₂-Konzentration wie auch durch höhere Wärme gesteigert werden kann. Nach ZIZKA et. al. 2003 wird bei hohen Lufttemperaturen und CO₂-Konzentrationen eine Zunahme allergieauslösender Proteine in Ambrosiapollen festgestellt. Ein weiteres Beispiel ist eine erhöhte Produktion eines allergieauslösenden Proteins bei Birkenpollen bei erhöhter NO_x-Konzentration (PÖSCHL 2005).

Nach der Weltgesundheitsorganisation gilt die Luftverschmutzung weltweit als das größte Umwel-

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

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

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



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

Landflucht und Zunahme der Megacities

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

Im Jahr 1870 gab es nur 3 Millionenstädte (London, Paris und New York City). 1910 nahm diese Zahl durch die Städte: Chicago, Tokio, Wien, Berlin, Sankt Petersburg, Moskau, Philadelphia, Buenos Aires und Bombay auf 12 zu. 1950 gab es bereits 20 Millionenstädte, im Jahr 2000 schon 371 und 2018

sogar 548; schon 2030 könnten es 706 sein (Vereinte Nationen). 2018 lag in 33 Städten die Einwohnerzahl über Zehn-Millionen (Megastadt), und nach den Vereinten Nationen wird es bis 2030 bis zu 43 derartig große Städte geben.

Die Veränderungen städtischer Ökosysteme

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

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

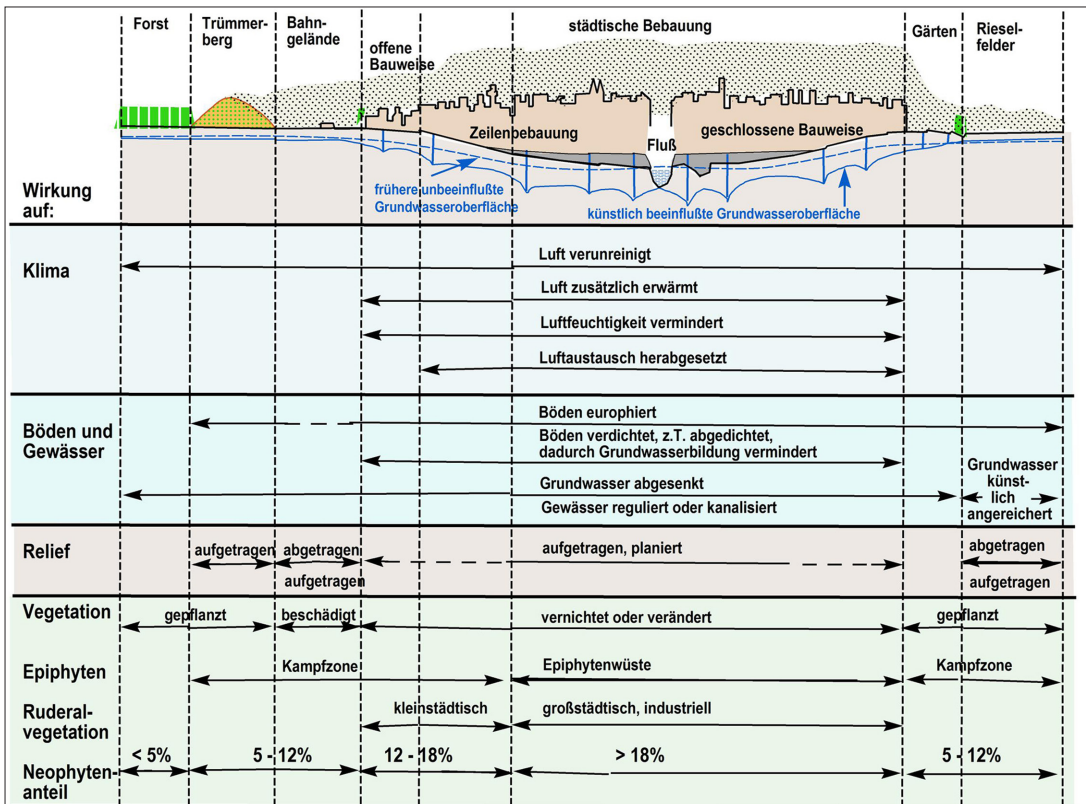


Abb. 6: Abiotische und biotische Komponenten in einem Querschnitt durch die Stadt (<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/stadtoekologie/15474> - verändert nach S.-W. Breckle).

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

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

Die städtischen Grünflächen sind eigene Ökosysteme, sie unterliegen dem wärmeren Stadtklima, Flora und Fauna bestehen anteilmäßig sehr viel mehr aus Neophyten und Neozoen, denen das wärmere Stadtklima behagt. Einerseits fördern erhöhte Temperatur, CO₂-Konzentration und Stickstoffeinträge im Allgemeinen das Pflanzenwachstum, andererseits sind städtische Böden aufgrund der Versiegelung eher trocken. Wasser ist für die Vegetation nur kurzzeitig verfügbar. Auch das geringere Vorkommen von Bestäubern und Fressfeinden hat einen Effekt. Naturgemäß gibt es weniger Insekten als in grünen suburbanen Gebieten.

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

Bei den heutigen Multi-Millionenstädten ist in manchen Ländern ein großer Ring an Slum-Siedlungen um die Stadt entstanden. Dieser Umstand macht das Stadt/Umland-Verhältnis noch schwieriger. Die weitere Ausdehnung mancher Millionenstädte führt zu einem immer stärkeren Abweichen des Stadtklimas vom Umland mit höheren Temperaturen, mit mehr Schwüle und auch oft mit deutlich höheren Niederschlägen, die aber nicht ausreichend schnell abfließen können. Die Auswirkungen ge-

gentlicher Wirbelstürme, selbst in hochentwickelten Ländern, wie Japan (Tokyo, Okt. 2019) und China, sind dann verheerend bis katastrophal.

Veränderung der Flora und Fauna in den Städten

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

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

Verkehr in der Stadt

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

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

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



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

Die schlechte Luftqualität und der Stadtlärm werden in Deutschland ganz wesentlich vom Straßenverkehr verursacht. Er ist zudem der Hauptverursacher der Stickstoffdioxid-Belastung und eine wichtige Feinstaubquelle. Nach wie vor wird der NO_2 -Grenzwert (Jahresmittelwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) an zahlreichen verkehrsnahen Messstationen überschritten. Im Jahr 2018 kam es in Deutschland immer noch an knapp 40% der verkehrsnahen Stationen zu Überschreitungen. Es sind also viele Menschen, besonders entlang stark befahrener Straßen, von hohen NO_2 -Konzentrationen betroffen.

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

Wasserversorgung in großen Städten

Hohe Temperaturen, Dürren und Hochwasser gefährden in vielen großen Städten auch die Wasserversorgung. Städte können in der Regel ihren Wasserbedarf nicht allein auf ihrem eigenen Gebiet decken, sondern sie sind auf die Ressourcen des Umlands angewiesen. Dabei werden oft Oberflächenwasserreserven aus

großen Entfernungen genutzt und in die Metropolen geleitet. Das größte Wassertransferprojekt der Welt ist z.Zt. in China im Bau, wo von dem Drei-Schluchten-Staudamm bis 2050 jährlich 45 Mrd. m^3 Wasser nach Norden geleitet werden sollen, um dort über eine halbe Mrd. Menschen, u.a. auch die Einwohner der Megastadt Beijing, zu versorgen (WBGU 2016). In Peru wird zur Versorgung der in der pazifischen Küstenwüste gelegenen Hauptstadt Lima das Amazonas-Flusssystem auf der Ostseite der Anden-Wasserscheide angezapft (s. Kap. 5.5 - in diesem Band). Wo ausreichende oberirdische Wasserressourcen fehlen, werden Grundwasserreserven genutzt und häufig übernutzt. Die Folge sind absinkende Grundwasserspiegel, das Absinken der Landoberfläche und in Küstenstädten das Eindringen von Salzwasser in Aquifere, was in besonderem Maße die Bewohner von Slumgebieten in Entwicklungsländern belastet, die oft von der öffentlichen Wasserversorgung ausgeschlossen sind und denen in vielen Fällen nur durch Abwasser belastetes Trinkwasser zur Verfügung steht (Abb. 10). Der Klimawandel verschärft vielerorts diese Probleme. Hohe Temperaturen und Dürren lassen durch zunehmende Verdunstung die Wasserressourcen schrumpfen (Abb. 11), Überschwemmungen kontaminieren vielfach das Brauchwasser, und der Meeresspiegelanstieg führt besonders in Deltagebieten zum Eindringen von Salzwasser (Kap. 3.3 - in diesem Band).



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



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

Hochwasser in Städten

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

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

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

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



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

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

Starkniederschläge in schnell wachsenden Städten

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

Starkregen in Deutschland: Umgang mit dem Wasser

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

Sicht war. Sie sind daher nicht für (z.T. mehrtägige) Starkregen dimensioniert. Hinzu kommt das Wachstum vieler Städte und die zunehmende Verdichtung und Versiegelung. So kommt eine Studie der Schadenverhütung GmbH aus dem Jahr 2018 zu dem Schluss, dass die 50 einwohnerstärksten Städte

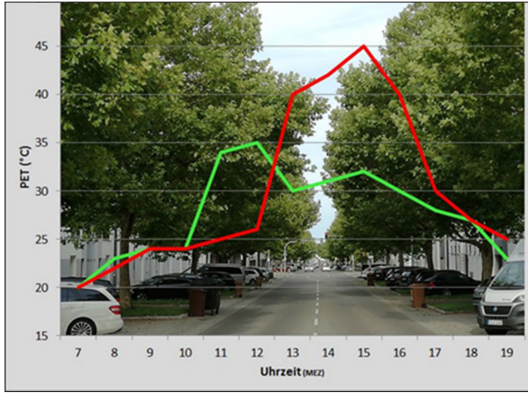


Abb. 13: Temperaturverlauf an einen Sommertag. Grün: in einem beschatteten und (Rot:) unbeschatteten Straßenabschnitt in München (Foto: J. Baumüller).

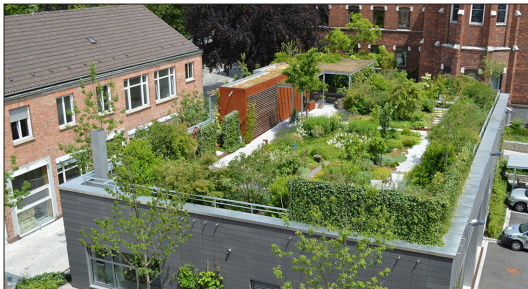


Abb.14: Dachbegrünung (Foto: Baumüller).



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

Deutschlands einen mittleren Versiegelungsgrad von über 30% besitzen. Die versiegelte Fläche nimmt mit der Bebauung und Bevölkerung weiter zu. Die Folge ist ein erhöhter Oberflächenabfluss, der von den Kanälen nicht mehr aufgenommen werden kann und zum Überstau aus der Kanalisation und Überflutungen an der Oberfläche führt.

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

Maßnahmen zur Reduzierung der thermischen und lufthygienischen Belastung

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

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

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

Klimaanpassungsmaßnahmen

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

Literatur

IPCC (2019): Land, Cross-Chapter Box 4.
 BAUMBACH G. (1991): Luftreinhaltung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d403_01.htm.
 KRUMMENAUER L. & J. KROPP (2018): Grenze der Wohnbarkeit in heißen Regionen am Beispiel des Nahen Ostens. https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2018/11/Krummenauer_Kropp.pdf
 KUTTLER W. (2018): Hitzewellen in großen Städten: Folgen für die Gesundheit und Gegenmaßnahmen. <https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2018/11/Kuttler.pdf>.
 MATTHEWS T. K. R., R. L. WILBY & C. MURPHY (2017): Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(15), 3861–3866, doi:10.1073/pnas.1617526114.
 MVI (Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg) (Hrsg.) (2012): städtebauliche Klimafibel. Stuttgart, 7-248 S. <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de>.

NKWUNONWO U. C., M. WHITWORTH & B. BAILY (2016): Review article: A review and critical analysis of the efforts towards urban flood risk management in the Lagos region of Nigeria, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 349-369, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-349-2016>
 STORCH H. VON, I. MEINKE & M. CLAUBEN (2018): Hamburger Klimabericht. Springer Natur. 302 S. <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-662-55379-4>.
 OKE T. R. (1978): Boundary layer climates. Methuen Ltd. 1978. 372. pp.
 PAPALEXIOU S. M., A. AGHAKOUCHAK, K. E. TRENBERTH & E. FOUFOULA-GEORGIOU (2018): Global, regional, and megacity trends in the highest temperature of the year: Diagnostics and evidence for accelerating trends. Earth's Future, 6, 71-79. <https://doi.org/10.1002/2017ef000709>.
 PÖSCHL U. (2005): Atmosphärische Aerosole: Zusammensetzung, Transformation, Klima- und Gesundheitseffekte. Angew. Chemie, 117, 7690-7712.
 UNITED NATIONS (2019): World Urbanization Prospects 2018. Highlights, New York.
 WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/der-umzug-der-menschheit-die-transformative-kraft-der-staedte>.
 WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/der-umzug-der-menschheit-die-transformative-kraft-der-staedte>.
 WHO (World Health Organisation) (2016): Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of disease.
 ZISKA, L. H., D. E. GEBHARD, D. A. FRENZ et al. (2003): Cities as Harbingers of Climate Change: Common Ragweed, Urbanization, and Public Health. J. Allergy Clinical Imm., 111, 2, 290-295.

Kontakt:

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

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

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

Dr. Dieter Kasang
 Deutsches Klimarechenzentrum
kasang@dkrz.de

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

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