



Wilhelm Kurtler. Foto: Timo Bobert

Der globale Klimawandel ist in aller Munde. Doch wie wirkt er sich auf das Ruhrgebiet aus? Der durch den weltweiten Treibhauseffekt verursachte Temperaturanstieg im Ruhrgebiet wird zu einer Vielzahl klimatischer Veränderungen führen, die im Wesentlichen in einer Verstärkung der thermischen Belastung für die Stadtbevölkerung gesehen werden, so prognostiziert Wilhelm Kuttler in diesem Beitrag. Außerdem geht er auf Möglichkeiten der Anpassung des städtischen Lebens an das veränderte Klima ein.

Das Ruhrgebiet im Klimawandel

Bestandsaufnahme und Prognose

Von Wilhelm Kuttler

Laut Publikationen des Weltklimarates ist davon auszugehen¹, dass der Klimawandel vorrangig durch anthropogene CO₂-äquivalente Emissionen verursacht wird, wodurch unter anderem die globale Mitteltemperatur weiterhin ansteigen soll. Die auch hierauf beruhende Beeinflussung der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre sowie die durch die Heterogenität der Erdoberfläche bedingte Regionalisierung des Klimas führen zu räumlich unterschiedlich starken Ausprägungen des vorhergesagten Temperaturanstiegs. Gebiete, die durch den Klimawandel in besonderem Maße betroffen sind, stehen dabei im Fokus der Forschung². Hierzu zählen vor allem städtische Agglomerationsräume, die sich durch hohe Bevölkerungsdichte, starke Oberflächenversiegelung und Luftverschmutzung vom umgebenden

Freiland abheben. Um den prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels in urbanen Gebieten begegnen zu können, sollte sich bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Stadt- und Umweltplanung dieser Probleme annehmen.

Am Beispiel des größten europäischen Wirtschaftsraums, des Ruhrgebiets, wird erläutert, welche klimatischen und lufthygienischen Veränderungen durch den Klimawandel zu erwarten sind und wie diesen auf lokaler Ebene entgegenge wirkt werden kann.

Auswirkungen des Klimawandels

Der Anteil am weltweit emittierten anthropogenen CO₂, der von Deutschland im Jahre 2008 (neuere Daten sind noch nicht verfügbar) emittiert wurde, beläuft sich auf rund 862 Millionen Tonnen³ und

entspricht damit etwa 2,7 Prozent der global auf etwa 31,5 Milliarden Tonnen geschätzten anthropogenen CO₂-Emission⁴. Insgesamt rund 40 Prozent der in Deutschland freigesetzten Emissionen gehen auf Kraftwerke zurück, der Rest verteilt sich zu etwa gleichen Anteilen auf die Abgaben durch Industrie, Gebäudebeheizung und Straßenverkehr.

Für Mitteleuropa und damit auch für das Ruhrgebiet kann davon ausgegangen werden, dass es zu folgenden Auswirkungen durch den globalen Klimawandel kommt⁵:

- Weniger Sommer-, mehr Winterniederschläge
- Häufigere Sommergewitter mit Starkregenabflussspitzen (Überschwemmungsgefahr) sowie Schlagregen auf Hauswände (mit der Folge erhöhter Schmutzstofffrachten durch den die Wände abwaschenden Regen)

- Zunahme austauscharmer Wetterlagen, thermischer Extremwerte sowie der Häufigkeit, Dauer und Intensität städtischer Wärmeinselereignisse
- Anstieg der Ozonkonzentrationen.

Im saisonalen Vergleich werden zum Beispiel in Essen die Sommerniederschläge (JJA) nach den Berechnungen mit Hilfe des Modells WETTREG⁶ während des Zeitraums von 2091 bis 2100 auf 76 Prozent des Wertes der Bezugsperiode (1991 bis 2000) zurückgehen, während die Winterniederschläge (DJF) auf 168 Prozent des aktuellen Mittelwertes ansteigen sollen. Eine Zunahme sommerlicher konvektiver Starkregen mit Niederschlagsmengen von beispielsweise mehr als 17 mm/h kann in Gebieten mit hoher Oberflächenversiegelung und in Senken zu Überschwemmungen führen und auf vegetationsfreien, geneigten Flächen durch Erosion Bodenabtrag verursachen⁷.

Grundsätzlich ist zu den Modellaussagen hinsichtlich der Niederschlagsprognosen anzumerken, dass diese – nach wie vor – als relativ unsicher anzusehen sind. So weichen die mit anderen Regionalmodelltypen (zum Beispiel STAR II) generierten Niederschlagsdaten im Jahresmittel um 20 Prozent von den oben genannten WETTREG Ergebnissen für den Standort Essen ab. Eine Lösung des Problems kann darin gesehen werden, dass im Rahmen der Standortaussage anstatt konkreter Prognosedaten die Ergebnisse der Gesamtheit verschiedener Modellläufe als möglicher variierender Wertebereich unter Nennung des wahrscheinlichsten Mittelwertes samt Standardabweichung deklariert werden. Eine solche Generierung von Werten nennt man auch „Multimodellsimulation“⁸ oder „Ensembleverfahren“, da man die Gesamtheit der Berechnung der zur Verfügung stehenden Modelle nutzt.

Die Auswirkungen des Klimawandels sind nach den vorliegenden Modellaussagen vielfältig. So wird es nicht nur zu einer langfristigen Veränderung des thermischen und

pluvialen Klimas auf regionaler Ebene kommen, sondern es wird sich auch großräumig das Spektrum der Großwetterlagen hinsichtlich ihrer Art, Häufigkeit, Dauer und Luftmassencharakteristik ändern⁹. Offensichtlich scheinen austauscharme Witterungsabschnitte mit mächtigeren Temperaturinversionen in ihrer Häufigkeit in Mitteleuropa zuzunehmen¹⁰. Derartige Wetterlagen sind im Wesentlichen an das Vorherrschen von Hochdruckgebieten gebunden, die sich durch Windarmut und stabile Schichtung sowie im Sommer – wegen der weitgehenden Wolkenlosigkeit – durch starke Sonneneinstrahlung und nächtliche negative Strahlungsbilanz auszeichnen. Hierdurch wird die Ausprägung des autochthonen, das heißt eigenbürtigen, mithin lokalen Klimas, begünstigt und es kommt zu einer Verschärfung des thermischen Stadt-

Island, UHI). Diese beziehen sich im Allgemeinen auf horizontale Temperaturunterschiede zwischen städtischen Baukörpern und unbebautem Umland (üblicherweise in zwei Metern Höhe über Grund gemessen). Städtische Wärmeinseln sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. So fördert eine hohe Einwohnerzahl, starke Oberflächenversiegelung mit einhergehender Verdrängung verdunstungsaktiver Flächen sowie eine mächtige Dunstglocke die Ausbildung des Temperaturgegensatzes zwischen Stadt und Umland und kann damit zu einem hohen Wert der UHI führen. Hingegen verursacht Bewölkung, starker Wind oder ein hoher Grünflächenanteil an der Gesamtfläche einer Stadt eine nur schwache Wärmeinselintensität. Tabelle (1) enthält eine Auswahl an entsprechenden Einflussfaktoren.

Einflussfaktoren (EF)	Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten zwischen Wärmeinselintensität (UHII) und EF
Wolkenbedeckungsgrad	–
Windgeschwindigkeit	–
Anthropogene Wärmeemission	+
Atmosphärische Gegenstrahlung („Dunstglocke“)	+
Bowen-Verhältnis ¹	+
Bevölkerungsdichte	+
Himmelssichtfaktor (engl. Sky View Factor, SVF ²)	–
Verhältnis Höhe Straßenrandbebauung/Straßenbreite	+
Oberflächenversiegelung und Bebauung	+
Grün- und Wasserflächenanteil/Gesamtfläche	–

¹ $Bo = Q_{Hf}/Q_E$; Q_{Hf} , Q_E = fühlbarer, latenter Wärmestrom
² SVF: Verhältnis von unbeeinflusster zu der am Standort vorherrschenden Himmelssicht

(1) Meteorologische und strukturelle Einflussfaktoren (EF) auf die städtische Wärmeinselintensität (UHII).

Quelle: Kuttler, W. (2009): Zum Klima im urbanen Raum. – In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2009): Klimastatusbericht 2008, Offenbach/M., 6–12

Umland-Gegensatzes aufgrund der unterschiedlichen Wärmeeigenschaften zwischen versiegelten und nicht versiegelten Flächen¹¹.

Überwärmungen urbaner Gebiete werden städtische Wärmeinseln genannt (englisch: Urban Heat

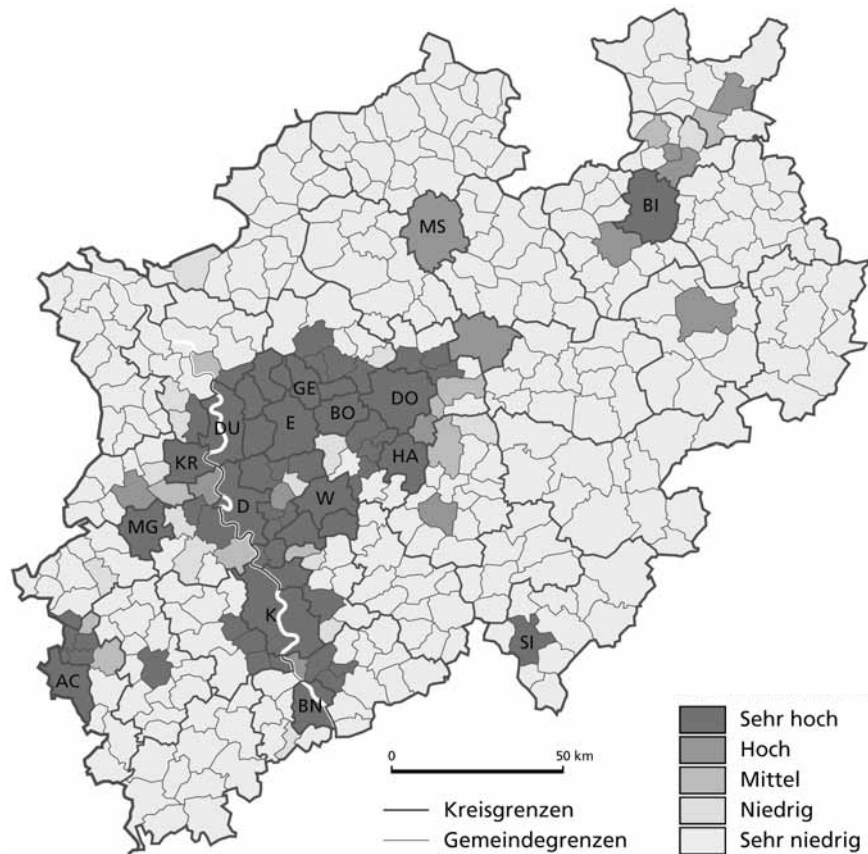
Die relativ einfach zu ermittelnden Größen Bevölkerungsdichte und Versiegelungsgrad werden häufig zur prognostischen Ermittlung der Intensität der städtischen Wärmeinseln herangezogen. Verschneidet man diese beiden Variablen

statistisch miteinander und ordnet die Ergebnisse Verwaltungseinheiten, zum Beispiel Kreisen oder Gemeinden zu, dann erhält man die in Abbildung (2) dargestellte Verteilung des Auftretts unterschiedlich starker städtischer Wärmeinseln am Beispiel Nordrhein-Westfalens. Wie der Karte entnommen werden kann, weisen die Stadtlandschaften an Ruhr und Rhein besonders hohe Werte auf, aber auch Großstädte in Einzellage, wie Münster und Bielefeld, erreichen ein hohes bis sehr hohes Wärmeinselpotenzial. Bei geeigneten Wetterlagen können UHI Werte erreicht werden, die maximale Temperaturdifferenzen von bis zu 9 °C aufweisen, wie eine in der Stadt Essen durchgeführte Messung bei Strahlungswetter verdeutlicht hat.

In Stadtquartieren, die bereits unter den gegebenen klimatischen Bedingungen Wärmeinseln aufweisen, dürften durch den Klimawandel die sommerliche Anzahl, Intensität und Andauer der Überwärmungsperioden zunehmen, falls nicht durch Maßnahmen der Stadt- und Umweltpflege diesen im Laufe der Zeit entgegengewirkt wird.

In welchem Maße sich das thermische Klima verändern wird, lässt sich eindrucksvoll auch mit Hilfe so genannter klimatischer Ereignistage quantifizieren. Hierbei handelt es sich um Schwellenwerte einer meteorologischen Größe, die zum Beispiel im Laufe eines Tages unter- oder überschritten wird¹². So wird ein Sommertag mit einem Maximalwert der Lufttemperatur von mehr als 25 °C definiert.

Geht man beispielsweise davon aus, dass unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen der aktuelle Mittelwert der Lufttemperaturmaxima der Sommermonate Juni, Juli und August in Essen einen Wert von 21,9 °C aufweist, dann lässt sich anhand Abbildung (3) ablesen, dass sich unter den jetzigen Klimabedingungen durchschnittlich 26 Sommertage ergeben. Stellt man die These auf, dass in einem zukünftigen Klima des Ruhrgebiets die Luft-



(2) Potenzial für die Ausbildung urbaner Wärmeinseln in NRW. Grundlage der Karte ist die Bevölkerungsdichte und der Anteil versiegelter Fläche. Quelle: Gerstengarbe und Werner 2005; verändert

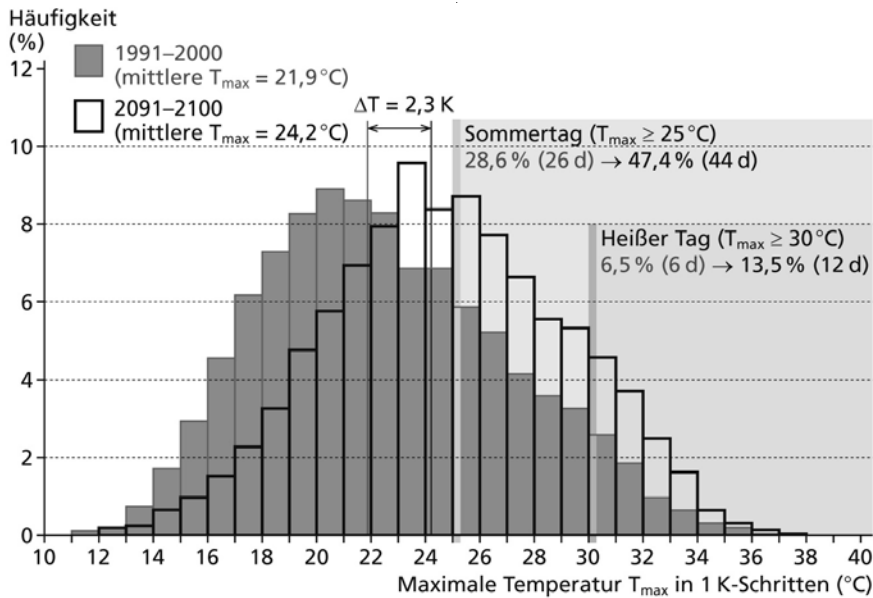
temperaturmittelwerte in Essen um 2,3 °C zunehmen, dann wird es zu einem Anstieg um weitere 18 Tage, auf dann 44 Tage, kommen. Das sind immerhin fast anderthalb Monate, an denen Sommertage im mittleren Ruhrgebiet während des Sommers vorherrschen werden. Heiße Tage, an denen die Lufttemperaturmaxima sogar 30 °C und mehr erreichen, nehmen unter den genannten Bedingungen von heute sechs Tage ein, unter den Konditionen des Klimawandels wird sich diese Zahl auf zwölf Tage erhöhen. Dieses stellt immerhin eine Verdoppelung der Anzahl des Ausgangswerts dar.

Diese Zahlen verdeutlichen auch eindrucksvoll, dass bei der Abschätzung der Klimawandelfolgen die alleinige Betrachtung der Änderung von Jahresmitteltemperaturen (hier +2,3 °C) über die Brisanz der Konsequenzen hinwegtäuscht wird, da in der zugehörigen Verteilungsstatistik

gerade die Extremwerte eine deutliche Änderung erfahren. Denn trotz des moderaten Anstiegs der Mitteltemperatur werden sich extreme Temperaturereignisse wie Sommertage oder heiße Tage in ihrer Anzahl vervielfachen.

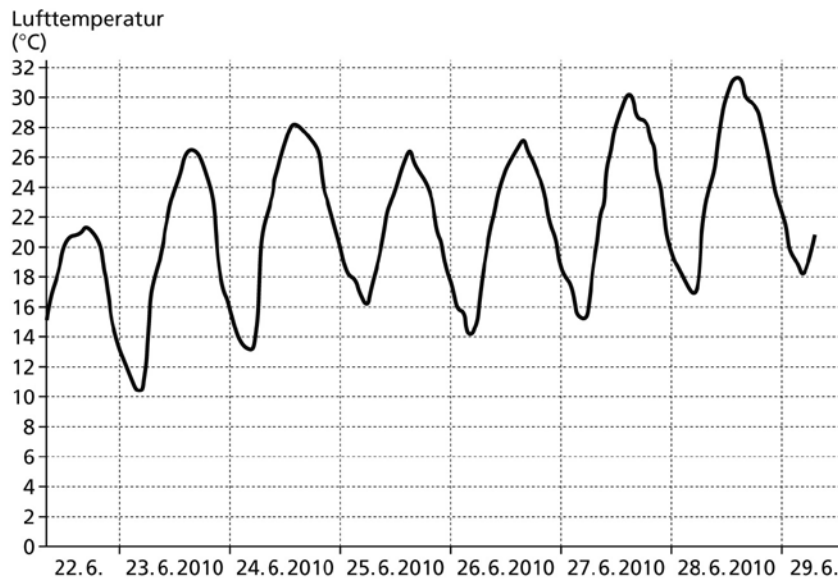
Aber auch die Änderung der Jahresmitteltemperatur von nur wenigen Grad Celsius kann bereits die Verschiebung eines Standortes in eine andere Klimazone bedeuten. Würde beispielsweise die für Essen genannte Temperaturerhöhung von 2,3 K auf eine bereits thermisch begünstigte Stadt wie Freiburg/Brsg. zutreffen, entspräche das dem Klima Norditaliens.

Der Eintritt einer Hitzeperiode stellt sich nicht „über Nacht“, das heißt in kurzer Zeit, ein, sondern erreicht meist kontinuierlich bei entsprechender Wetterlage das genannte hohe Temperaturniveau. Das bedeutet, dass die Anzahl der erwähnten



(3) Verteilung der Maxima der Lufttemperaturen in den Sommermonaten am Standort Essen im gegenwärtigen und zukünftigen Klima.

Quelle: Modell WETTREG/ECHAM5; IPCC-SRES-Szenario: A1B; verändert; Dütemeyer pers. Mitt.



(4) Entwicklung der Lufttemperatur während einer Schönwetterepisode im Ruhrgebiet.

Quelle: Messwerte der Klimastation der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, vom 22.6. bis 29.6.10; Büns pers. Mitt.

thermischen Ereignistage eher als Untergrenze einer anthropogenen Wärmebelastung anzusehen ist. Dabei ist es nicht ausschließlich die tagsüber herrschende Hitze, die die Wärmebelastung des Menschen verursacht, sondern häufig auch die mangelnde nächtliche Abkühlung, die eine gesunde Schlafentiefe verhindert.

Wie Abbildung (4) zu entnehmen ist, steigen nicht nur die Tages-

maxima der Lufttemperaturen an, sondern, da die nächtliche Abkühlung die sich täglich erhöhende Wärmeaufnahme von Atmosphäre und Gebäuden nicht kompensieren kann, nehmen auch die Minima, mithin die Nachttemperaturen, mit Fortdauer des warmen Wetters, zu. In diesem Zusammenhang kann man von einem thermischen „Akkumulationseffekt“ sprechen. So stiegen

während der in Abbildung (4) dargestellten Schönwetterepisode die Tagesmaxima von 22°C (22.6.) auf fast 32°C (28.6.) an, während die Nachttemperaturen von 10°C (23.6.) zu Beginn auf 18°C bis zum Ende dieser Wetterlage (29.6.) zunahmen.

Wärmebelastungen führen, wenn sie über mehrere Tage oder gar Wochen andauern, nicht nur zu gesundheitlichen Problemen, sondern auch zu volkswirtschaftlichen Beeinträchtigungen in mehreren Sektoren¹³.

Neben Einschränkungen oder Einbußen in der Landwirtschaft, der Binnenschifffahrt, der Industrie, der Wasserversorgung und Energiegewinnung ist auch die Bevölkerung direkt betroffen. Dies gilt für die Arbeitswelt, und zwar nicht nur für Tätigkeiten im Freien (Bau-, Gartenbau-, Landwirtschaft, etc.), sondern auch für innerhäusliche Tätigkeiten (Büros, Fabriken), solange hier nicht, wie in Industriestaaten warmer Klimazonen seit langem üblich, die Gebäude aktiv gekühlt werden.

Wärmebelastung betrifft im privaten Bereich, solange hier ebenfalls die Wohnungen nicht aktiv gekühlt werden, insbesondere die Einschränkung der Erholung während der Nachtruhe („Heiße Nächte“), so dass am Tage die volkswirtschaftlich benötigte Arbeitskraft nicht im vollem Umfang zur Verfügung steht.

Werden nämlich bestimmte Grenzwerte der Wärmebelastung überschritten, die zum Beispiel mit Hilfe entsprechender thermischer Indices wie PET (Physiologically Equivalent Temperature), pt (gefühlte Temperatur) oder auch PMV (Predicted Mean Vote) ermittelt werden können, ist von erhöhten Morbiditäts- oder sogar Mortalitätsraten auszugehen.

So hatten sich in Mitteleuropa während der beiden sommerlichen Hitzewellen im Jahr 2003 die Sterberaten signifikant erhöht¹⁴. In Deutschland waren seinerzeit über die statistische Erwartung hinaus zusätzlich etwa 7.000 Personen wäh-

rend der Hitzewelle gestorben, in Frankreich war sogar ein Verlust von 14.000 Menschen zu verzeichnen.

Die Hitzewellen im Sommer 2003, aber auch 2010 haben zum Beispiel im Ruhrgebiet dazu geführt, dass der Verkauf mobiler Klimaanlage zur Kühlung von Wohnungen und Häusern außergewöhnlich stark anstieg. In einzelnen Baumärkten waren diese Geräte sogar zeitweise ausverkauft. Zwar lassen sich mit Hilfe von Klimaanlage Innenräume wirksam kühlen, da jedoch die Nennleistung derartiger Anlagen durchaus 10 oder sogar 20 kW aufweist, resultiert daraus bei einem angenommenen zehnstündigen Betrieb ein Stromverbrauch von 100 bis 200 kWh. Ein derartig hoher, zusätzlicher Bedarf, der für das Versorgungsnetz der RWE im Sommer 2003 nachgewiesen werden konnte¹⁵, führt wegen der höheren Kraftwerksleistung auch zu einem verstärkten CO₂-Ausstoß. Da prognostiziert wird, dass der Klimawandel die Anzahl der Hitzewellen erhöhen wird, sollte es Ziel einer vorbeugender Objekt- und Stadtplanung sein, durch geschickte Temperatur senkende planerische Maßnahmen den Einsatz von Klimaanlage möglichst zu reduzieren oder sogar überflüssig zu machen, um die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu vermeiden.

Grundsätzlich wird allerdings auch in Mitteleuropa davon auszugehen sein, dass in Deutschland das Stromverbrauchsverhältnis zwischen Sommer (JJA; 124.241 Mio kWh) und Winter (DJF; 136.069 Mio kWh) mit einem derzeitigen Quotienten von 0,9¹⁶, größer wird. Für den Agglomerationsraum Tokio konnte zum Beispiel anhand von Simulationsrechnungen ermittelt werden, dass sich der Energieverbrauch bei einem Anstieg der Lufttemperaturen von einem Grad Celsius um drei Prozent erhöhen wird¹⁷.

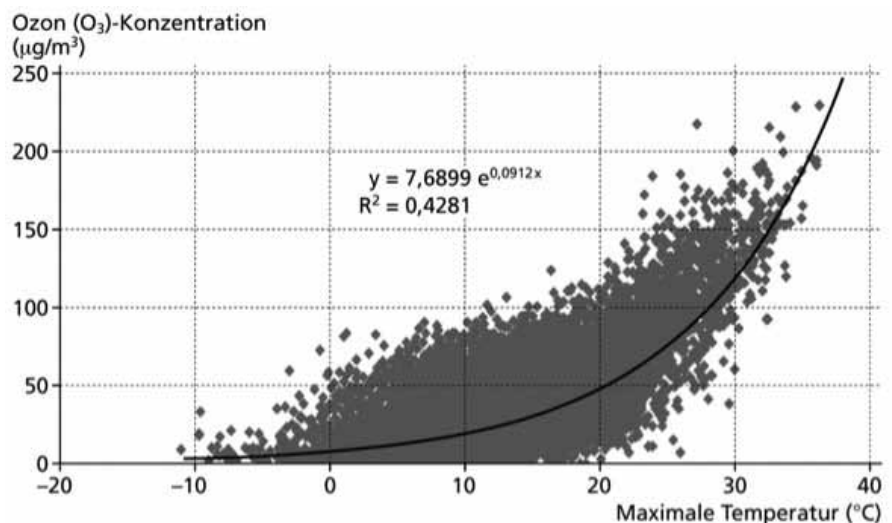
Ferner würde in dicht bebauten Wohnquartieren unter der Annahme, dass alle Gebäude, Wohnungen oder Büros mit einer

eigenen Klimaanlage ausgestattet wären, die Überwärmung im Freien gesteigert, da Klimaanlage aufgrund ihres Arbeitsprinzips der Kältepumpen (Kühlschrankeffekt) zwar nach innen Kälte erzeugen, aber nach außen gleichzeitig Wärme abgeben.

Der Klimawandel wird wegen der prognostizierten Zunahme sonnenscheinreicher Witterungsabschnitte bei überwiegender Wolkenarmut allerdings nicht nur zu einem Temperaturanstieg führen, sondern auch zu einer Erhöhung der Globalstrahlungsstromdichte. Da sowohl hohe Temperaturen als auch kräftige Sonneneinstrahlung wichtige Voraussetzungen zur Bildung des sekundären Spurenstoffs

der Vorläufergase (PAN, Peroxyacetylnitrat), das an der Ozonbildung beteiligt ist, erst bei höheren Temperaturen zersetzt wird, wodurch entsprechende Stickstoffverbindungen abgegeben werden, die wiederum die Grundlage der Ozonentstehung bilden. Ferner werden verstärkt biogene Kohlenwasserstoffe (zum Beispiel Isopren) freigesetzt.

Legt man in diesem Zusammenhang den seit Januar 2010 gültigen Zielwert für Ozon zum Schutz der menschlichen Gesundheit (höchster 8-Stunden-Mittelwert eines Tages $\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 25 zulässige Überschreitungen pro Kalenderjahr, gemittelt über 3 Jahre) für einen Vergleich zugrunde, wird sich die Anzahl der Überschreitungstage im Ruhrgebiet



(5) Abhängigkeit der Ozonentstehung von der Lufttemperatur für den Industriegebietsstandort Duisburg-Walsum (1984-2007).

Quelle: Melkonyan, pers. Mitt., Daten nach LANUV, Essen

Ozon sind, werden die Ozonkonzentrationen ansteigen¹⁸. Ein eindrucksvolles Beispiel der temperaturabhängigen Entstehung von Ozon zeigt Abbildung (5) anhand einer langjährigen Datenreihe der Station Duisburg-Walsum des LANUV, NRW. Hiernach belaufen sich die Ozonkonzentrationen im Mittel bei 10 °C auf rund 19 µg/m³, bei 20 °C schon auf 47 µg/m³ und steigen bei 30 °C sogar auf 119 µg/m³ an. Dieser exponentielle Anstieg hängt damit zusammen, dass eines

(wiederum berechnet für den Standort Duisburg-Walsum) von derzeit 16 Tagen auf zukünftig 33 Tage in einem veränderten Klima mehr als verdoppeln¹⁹.

Gegenmaßnahmen auf städtischer Ebene

Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel müssen insbesondere vor allem auf städtischer Ebene ergriffen werden. Zwar weisen urbane Gebiete weltweit nur einen



(6) Plus-Energie-Haus der Technischen Universität Darmstadt (Standort Burgplatz, Essen, Mai 2010).
Foto: Wilhelm Kuttler

Anteil von etwa 2,7 Prozent an der Gesamtoberfläche der Kontinente auf²⁰, jedoch werden im Laufe des 21. Jahrhunderts mehr als 70 Prozent der Menschen in Städten leben²¹. Urbane Räume stellen darüber hinaus eine wesentliche Nettoquelle des anthropogenen CO₂ dar²².

Jedoch sind die Auswirkungen, die mit dem Klimawandel verbunden sind, nicht in jeder Klimazone für den Menschen oder die Volkswirtschaft als negativ anzusehen. So werden sich zum Beispiel in Mitteleuropa und damit auch im Ruhrgebiet die Wintertemperaturen erhöhen, mit dem Effekt, dass seltener Schnee oder Eis auf den städtischen Straßen und Bürgersteigen beseitigt werden muss, wodurch Kosten eingespart werden können²³. Ferner wird der Energieaufwand für die Beheizung von Gebäuden niedriger ausfallen als bisher, sodass die CO₂-Emissionen reduziert werden können, da ja ein Großteil der im privaten Sektor eingesetzten Energie in Deutschland für die Gebäudebeheizung aufgewendet werden muss.

Diesen durchaus positiven Wirkungen stehen jedoch Nachteile gegenüber, wie die im Sommer gehäuft und verstärkt zu erwartenden Hitzewellen mit den genannten Nachteilen auf das menschliche Wohlbefinden. Im Winter ist aufgrund des möglicherweise zu erwartenden Niederschlagsanstiegs mit häufigeren Hochwassern zu rechnen, wenn die winterkahle Vegetation aufgrund fehlender Interzeption nicht genügend Niederschlag vom Abfluss zurückhalten kann.

Mit geeigneten Maßnahmen der Objekt- und Stadtplanung sollte der in den Städten bevorzugt auftretenden Überwärmung begegnet werden. Bei der Temperaturreduktion und der Verminderung von CO₂-Emissionen sollten zwei Ziele verfolgt werden, die mit den bekannten Schlagwörtern „Mitigation“ und „Adaptation“ umschrieben werden.

Unter Mitigation, deutsch: Abschwächung, wird allgemein das menschliche Bemühen verstanden, die Quellstärke der Treibhausgase

zu verringern und die Aufnahme von CO₂ durch Pflanzen oder seine technische Sequestrierung (Verbringung von komprimiertem CO₂ in unterirdischen Kavernen) zu erhöhen. Beides führt zu einer Reduzierung dieses infrarotaktiven Gases in der Atmosphäre, wodurch die CO₂-Senke verstärkt wird²⁴.

Bei der Adaptation, deutsch: Anpassung, handelt es sich um Maßnahmen, die „die Empfindlichkeit natürlicher und menschlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung verringern“²⁵.

Auch an dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass der durch den Klimawandel erwartete thermische Stress im Wesentlichen auf die Sommermonate beschränkt ist. Das heißt, Maßnahmen, die während des Sommers einer Wärmebelastung entgegenwirken, sollten sich im Winter nicht als nachteilig hinsichtlich der Energiebilanz auswirken. Nachfolgend werden verschiedene Möglichkeiten genannt, mit deren

Hilfe das Stadtklima verbessert und die CO₂-Emissionen verringert werden können. Hierzu zählen im Einzelnen:

- Energieeinsparungen durch Verhaltensänderungen der Bevölkerung sowie Optimierung der Gebäudewärmedämmung

Eine der wichtigsten Maßnahmen sollte es sein, das menschliche Verhalten hinsichtlich des Energieverbrauchs zu beeinflussen. Allein durch sparsameren Umgang mit Energie ließe sich ein Großteil der CO₂-Emissionen vermeiden. Dazu zählt zum Beispiel die Bereitschaft, die Innenraumtemperaturen im Winter zu reduzieren und das entstehende Wärmedefizit durch Tragen wärmerer Kleidung zu kompensieren. Auch sind die spezifischen Energieverbräuche der Wohnungs- und Gebäudebehei-

- Bau von Passiv- beziehungsweise Plus-Energie-Häusern

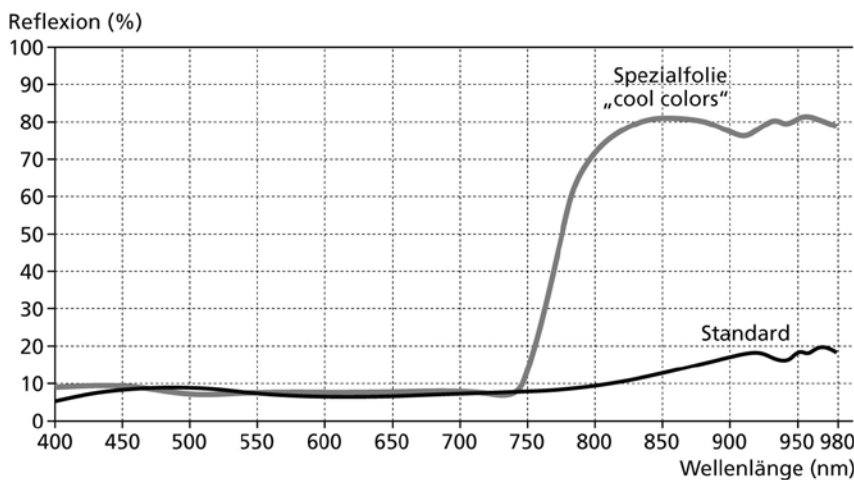
Durch den Bau von Passivhäusern werden gegenwärtig schon sehr niedrige spezifische Wärmeverbräuche erreicht, die zwischen 10 und 15 kWh/(m²·a) liegen. Wesentlich besser stellen sich die Bilanzen von sogenannten Plus-Energie-Häusern dar, die sogar eine positive Energiebilanz insofern aufweisen, da sie mehr Energie produzieren als sie verbrauchen. Das geschieht nicht nur durch geschickte Anbringung von Photovoltaikpaneelen an den Hauswänden und auf dem Dach sowie der effizienten Nutzung von Wärmepumpen, sondern auch durch die Verwendung von hochwärmedämmenden, luftdichten Bauteilen für die Wände sowie eine geregelte Lüftung mit Wärmerückgewinnung²⁶. Die vollständige Verschalung der Fassade mit dunklen Photovoltaik-Modulen

Denn die Verdunstung von Wasser benötigt sehr viel Energie. Diese wird beim Verdunstungsprozess dem verdunstenden Medium entzogen, wodurch dieses abkühlt („Verdunstungskälte“). Die Verdunstung kann über verschiedene Umweltmedien erfolgen. So von Wasserflächen oder natürlichem Boden sowie über die Transpiration der Pflanzen. Sichergestellt sein müsste in diesem Zusammenhang, dass die Böden gut mit Wasser versorgt sind und die Oberflächen grundsätzlich niedrige Abflussbeiwerte (Verhältniswert von Abflussmenge zur Niederschlags-summe) aufweisen, um die Versickerung von Niederschlagswasser in den Untergrund zu ermöglichen. Entsprechende Forschungsprojekte werden verstärkt auf nationaler und internationaler Ebene gefördert und sind auch an der Universität Duisburg-Essen angesiedelt. Mehr dazu unter www.dynaklim.de.

- Erhöhung der Oberflächenreflexion und Beschattung

Direkte Maßnahmen, die Oberflächenenergiebilanzen im Sinne einer geringeren Aufheizung im Sommer zu beeinflussen, sollten darin bestehen, helle, reflektierende Materialien zu verwenden. Dies führt nicht nur über die Absenkung der Oberflächentemperaturen zu einer Reduzierung der langwelligen Wärmestrahlung, sondern auch zu einer Verringerung der Lufterwärmung durch eine kleinere turbulente sensible Wärmestromdichte. Dunkle Oberflächen, zum Beispiel Asphaltstraßen und Teerdächer, die sich bei starker Einstrahlung durchaus auf bis zu 80 °C erhitzen können, geben dabei etwa 880 W/m² an langwelliger Strahlungsenergie ab. Durch geeignete Aufhellung dieser Oberflächen könnte zum Beispiel die Temperatur auf vielleicht 50 °C gesenkt werden, wodurch mehr als 250 W/m² weniger an langwelliger Strahlung emittiert würde.

Doch nicht nur im kurzwelligen Bereich kann durch Erhöhung der Reflexion die Strahlungsbilanz



(7) Abhängigkeit der Reflexion zweier Oberflächen (Standard, nicht beschichtet und „cool colors“, mit langwellig reflektierender Folie) in dunkelgrüner Farbe von der Wellenlänge. Quelle: Fa. Hornschuch 2010, verändert

zungen derzeit noch viel zu hoch. So sollte der Energieeinsatz pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr bei deutlich unter 100 kWh/(m²·a) liegen. Leider ist es nach wie vor so, dass mittlere Verbräuche im Ruhrgebiet mehr als 200 kWh/(m²·a) erreichen. Staatliche Programme helfen, die Wärmedämmung von Gebäuden zu optimieren.

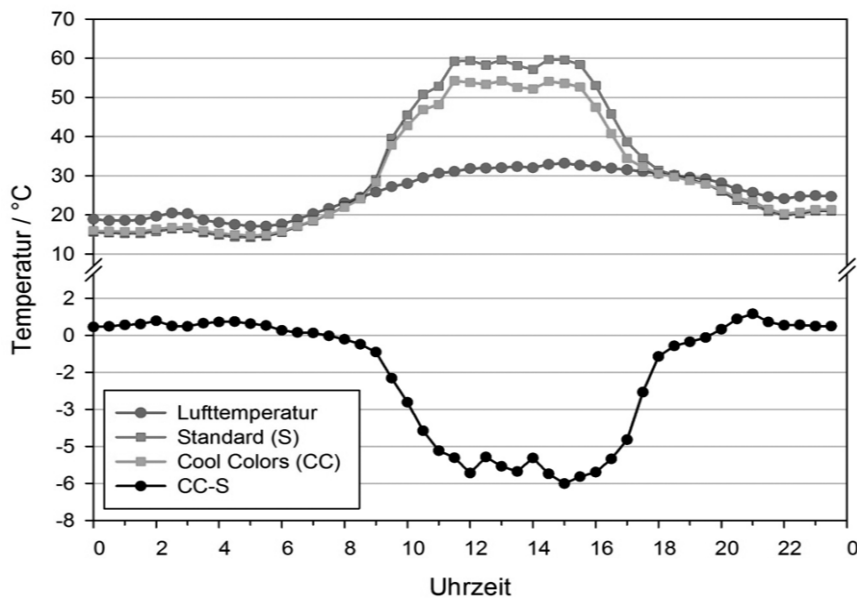
eines derartigen Haustyps lässt sich in Abbildung (6) gut erkennen.

- Entsiegelung von Oberflächen

Der nach wie vor hohe Anteil an versiegelten Flächen in Städten sollte immer dort verringert werden, wo das möglich ist, zum Beispiel auf Plätzen und Garageneinfahrten etc.

hinsichtlich einer verringerten Wärmeaufnahme verbessert werden, sondern auch im langwelligen Bereich, wenn Oberflächen mit einer speziellen Beschichtung versehen werden, die Wärmeströme im nahen Infrarot reflektieren (Abb. 7). Wegen ihrer Temperatur senkenden Wirkung werden derartige Oberflächenbeschichtungen treffenderweise auch „cool colors“ genannt. Die Reflexion ist im langwelligen Bereich um bis zu 60 Prozent höher als bei unbehandelten Oberflächen. Wie Abbildung (8) zeigt, können sich im Tagesverlauf Temperaturunterschiede zwischen beiden Oberflächen von bis zu 10 °C ergeben.

mit Thermofarben, die nach dem Thermochromieverfahren die Eigenschaft besitzen, in Abhängigkeit von der Temperatur ihre Farbe zu verändern („Chamäleoneneffekt“). Bei hohen Temperaturen würden helle, bei niedrigen Temperaturen dunkle Oberflächen entstehen. Dadurch würde sehr effektiv die Reflexion in Abhängigkeit hoher und niedriger Temperaturen (Sommer und Winter) beeinflusst, was zu unterschiedlicher Wärmeabsorption führte. Eine großtechnische Nutzung und damit eine weite Verbreitung von Thermofarben ist derzeit jedoch noch nicht abzusehen.



(8) Tagesgang der Temperaturen einer Standardoberfläche (S) und einer „cool colors“ Oberfläche (CC), deren Differenzen (CC – S) sowie der Luft an einem Strahlungstag (26. 6. 2010) Standort: Klimastation der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen.

Grundsätzlich sollte bei objektbezogener Beschattung daran gedacht werden, dass diese möglichst reversibel angebracht wird, mit der Folge, dass im Sommer bestmögliche Beschattung gewährleistet wird, während im Winter bei kurzen Tagbögen der Sonne für eine optimale Einstrahlung gesorgt wird, was gegebenenfalls zur Erwärmung von Gebäuden genutzt werden kann.

Optimal für Gebäudeenergiebilanzen wären zum Beispiel Anstriche

• Stadtstruktur und Grünflächen

Eine dem Klimawandel gerecht werdende Stadtplanung sollte eine kompakte, dennoch perforierte, also gut durchlüftete Bebauungsstruktur favorisieren, die mit ausreichenden Grün- und Freiflächen versehen ist und Möglichkeiten zur Beschattung bietet. Eine optimale Anbindung der Bevölkerung an den Personennahverkehr erspart grundsätzlich den Gebrauch von Privatkraftfahrzeu-

gen in den Innenstädten („Stadt der kurzen Wege“) und reduziert damit die Emission von Abgasen, Feinstaub und CO₂. Bebauungsdichte und Beschattungsmöglichkeiten sollten so gewählt werden, dass im Sommer ausreichender Schutz vor solarer Einstrahlung gegeben ist, im Winter hingegen größtmögliche Strahlungsaufnahme durch die Gebäude garantiert wird. Das vielerorts zu beobachtende suburbane Wachstum („urban sprawl“) sollte zugunsten des Erhalts stadtrandnaher Kaltluftbildungsflächen aufgegeben werden.

Grundsätzlich ist der Anteil der Durchgrünung in den Städten zu erhöhen, um die Oberflächen- und Lufttemperaturen zu senken. Dabei sollte beachtet werden, als Straßenbegleitgrün hochwachsende, großkronige, schattenspendende Laubbäume zu verwenden, die im Sommer den gewünschten Strahlungsschutz gewährleisten, im Winter hingegen, bei fehlender Belaubung, die Sonnenstrahlung weitgehend durchlassen. Allerdings sollten Straßenbäume über der Straßenmitte keinen gemeinsamen Kronenschluss aufweisen, da ein derartiger „Tunneleffekt“ die Belüftung behindern und so zu einer Anreicherung der Kfz-Emissionen führen kann.

Größere ebenerdige Grünflächen in Städten sollten nach dem Savannenprinzip gestaltet werden: Auf Rasenflächen sollten nur vereinzelt großkronige Bäume wachsen, die tagsüber zwar für eine ausreichende Beschattung sorgen, nachts hingegen die langwellige Wärmestrahlung des Bodens nicht so stark behindern, dass keine Abkühlung mehr möglich ist.

Ferner sollte sich urbane Grünplanung dadurch auszeichnen, dass neben der Verwendung von Laubbäumen auch immergrüne Vegetation angepflanzt wird. Denn letztere zeichnet sich nicht nur durch eine höhere Transpiration aus, sondern bindet auch ganzjährig mehr Feinstaub als Laubbäume.

Damit die positive Wirkung von urbanen Grünflächen nicht nur auf das jeweilige lokale Umfeld begrenzt bleibt, sollte eine innerstädtische Freiraumvernetzung angestrebt werden, die im Idealfall über Ventilationsbahnen an rurale Kaltluftproduktionsflächen angebunden ist.

Wegen der zu erwartenden häufiger auftretenden hohen sommerlichen Temperaturen und geringeren Niederschlagsmengen, sollten trockenolerante Pflanzen bevorzugt in den Städten Verwendung finden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass während hoher Temperaturen verschiedene Pflanzenarten in starkem Maße biogene Kohlenwasserstoffe (englisch: Volatile Organic Compounds, VOC), welche die Ozonbildung begünstigen, freisetzen können, wozu zum Beispiel das hochreaktive Isopren, aber auch Terpene und Limulen zählen²⁷. Aus diesem Grund sollte möglichst eine städtische Vegetation Verwendung finden, die zu den sogenannten „Low-Emitter-Pflanzen“ zählen. Dabei handelt es sich um Pflanzen, deren Isoprenemission unter Hitzestress nicht mehr als 2µg/g Trockensubstanz aufweist. Tabelle (9) enthält ausgewählte Beispiele an Bäumen, die sowohl durch ein geringes Ozonbildungspotenzial charakterisiert werden als auch optimale Toleranzen gegenüber Trockenheit bei fehlender Wasserversorgung aufweisen.

Abschließend ist auf die Wirkung von Fassaden- und Dachbegrünungen hinzuweisen, die in erster Linie eine Objekt bezogene Wirkung entfalten und keinen weiteren Platz in dicht bebauten Innenstadtbereichen beanspruchen.

Fassaden- und Dachbegrünungen sollten zum Beispiel aus immergrüner trockenadaptierter Vegetation bestehen. Dadurch wird das entsprechende Gebäude im Sommer gekühlt und im Winter gegen Wärmeabfluss nach außen isoliert. Eine Gegenüberstellung der Energiebilanzen eines begrünenden und eines mit Kies bedeckten Daches erfolgt exemplarisch in Tabelle (10).

Für den hier dargestellten strahlungsreichen Sommertag zeigt sich, dass im Falle des mit Wasser versorgten „Gründaches“ der größte Teil, nämlich fast 4/5 der Energie, über die Evapotranspiration (Verdunstung feuchten Bodens und Transpiration der Pflanzen) abgegeben wird. Das bedeutet, dass die Energie für den latenten Wärmestrom aufgewendet wird und deshalb die Luft nicht erwärmt. Die Verdunstungsenergie wird dabei im

spiration – zu gleichen Teilen die Luft und das Dach des Gebäudes erwärmt. Dadurch steigt die Gebäudedeckentemperatur um 10 °C auf 40 °C an, wodurch im Vergleich zum „Gründach“ (30 °C) etwa 70 W/m² mehr an Wärme in das mit Kies bedeckte Dach des Gebäudes fließt. Geht man einmal davon aus, dass diese maximalen Strahlungsverhältnisse fünf Stunden pro Tag um die Mittagszeit andauern, dann werden durch das „Gründach“ bei

Pflanze Lateinischer Name	Populärer Name	Geringes Ozonbildungspotenzial	Hohe Trockentoleranz
<i>Acer campestre</i>	Feld-Ahorn	++	++
<i>Acer rubrum</i>	Rot-Ahorn	++	++
<i>Carya ovata</i>	Schuppenrinden-Hickory	++	+
<i>Carya tomentosa</i>	Spottnuss	++	++
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	Grün-Esche, Rot-Esche	++	+
<i>Ginkgo biloba</i>	Ginkgo, Fächerbaum	++	++
<i>Malus tschonoskii</i>	Woll-Apfel	++	+
<i>Pinus ponderosa</i>	Gelb-Kiefer	+	++
<i>Pinus sylvestris</i>	Wald-Kiefer	+	++
<i>Prunus avium</i>	Vogel-Kirsche	++	++
<i>Pyrus communis</i>	Kultur-Birne	++	+
<i>Pyrus pyrastra</i>	Wild-Birne	++	+
<i>Quercus rubra</i>	Rot-Eiche	+	+
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Gemeine Robinie	++	++
<i>Sophora japonica</i>	Japanischer Schnurbaum	+	++
<i>Ulmus parvifolia</i>	Japanische Ulme	++	+
<i>x Cupressocyparis leylandii</i>	Leylandzypresse	++	+
<i>Zelkova serrata</i>	Japanische Zelkove	++	+

++ = sehr gut; + = gut

(9) Ozonbildungspotenzial (OZBP) und Trockentoleranz ausgewählter Baumarten und ihre Verwendungsempfehlung bei höheren Temperaturen. Quelle: kombiniert nach Roloff et al. 2008; Benjamin & Winer 1998; verändert

Wesentlichen aus dem verdunstenden Medium, mithin aus der Dachbegrünung, entnommen, wodurch sich diese abkühlt. Nur elf Prozent der Energie werden dabei in den Untergrund geleitet, wodurch das Dach des Gebäudes eine Temperatur von etwa 30 °C annimmt.

Ganz anders verhält sich das mit Kies bedeckte, trockene Dach hinsichtlich seiner Energiebilanz.

Hier wird – in Ermangelung der Energieabfuhr durch Evapotran-

der zugrundegelegten Gesamtdachfläche von 1.000 Quadratmetern mindestens 350 kWh an Energie zur Kühlung eingespart. Da durch den deutschen Kraftwerksmix zur Produktion von 1 kWh Strom etwa 0,6 kg CO₂ emittiert werden, vermeidet ein „Gründach“ allein an einem Strahlungstag eine Freisetzung von wenigstens 210 Kilogramm CO₂ an die Atmosphäre. Berücksichtigt man nach konservativer Abschätzung etwa 30 derartige Strahlungstage

pro Jahr (mit ansteigender Tendenz durch den Klimawandel), dann würden gegenwärtig Emissionen von mehr als sechs Tonnen CO₂ pro Jahr hierdurch vermieden.

Sollen „Gründächer“ neben den unbestreitbaren mikroklimatischen Vorteilen (auf die ebenfalls günstige Wasserbilanz und das Staubsammel-potenzial wurde hier nicht eingegan-

Umwelt- und klimagerechten Nutzung zuzuführen.

Gerade die Ruhrgebietsstädte zeichnen sich nach dem Strukturwandel durch weitläufige, ungenutzte und oftmals innenstadtnahe Brachflächen aus, die ein hervorragendes Potenzial zur umwelt- und klimagerechten Neugestaltung ganzer Stadtteile bieten.

Begrüntes Dach	Kiesdach
9 % Lufterwärmung	50 % Lufterwärmung
79 % Verdunstung	0 % Verdunstung
11 % Bodenwärmestrom	50 % Bodenwärmestrom
Untergrundtemperatur: 30 °C	Untergrundtemperatur: 40 °C

(10) Vereinfachte Energiebilanzen für ein bewässertes begrüntes Dach und ein Kiesdach während eines Sommertages. Gleicher Aufbau beider Dächer.

Quelle: Höschele und Schmidt 1974; vereinfacht

gen) auch auf Stadtquartierebene klimaverbessernde Wirkungen haben, dann sollten möglichst viele, insbesondere niedrige Häuser Fassaden- und Dachbegrünungen aufweisen.

Bei den städtebaulichen flächenintensiven Minderungsmaßnahmen wie Oberflächenentsiegelungen, Frei- und Grünraumplanung und der Erhaltung oder Ausweisung von Ventilationsbahnen und Vernetzungskorridoren sind die Handlungsmöglichkeiten begrenzt, da der städtische Baukörper in der Regel historisch gewachsen und somit bereits vorhanden ist. Da im Bereich der bestehenden Bebauung die Erneuerungsrate der Flächennutzung bei nur ein bis zwei Prozent pro Jahr liegt, ist eine weiträumige Durchsetzung dieser Maßnahmen auch langfristig eher unwahrscheinlich.

Eine Ausnahme hiervon bilden ehemals industriell geprägte Städte, in denen im Zuge des Strukturwandels alte, große Industrieflächen einer neuen Nutzung zugeführt werden können. Auch die bereits einsetzende demografisch bedingte Schrumpfung der Städte²⁸ ermöglicht es, offen gelassene Wohnquartiere einzureißen und einer neuen,

Ausblick

Der durch den globalen Treibhauseffekt verursachte Temperaturanstieg im Ruhrgebiet wird zu einer Vielzahl klimatischer Veränderungen führen, die im Wesentlichen in einer Verstärkung der thermischen Belastung für den Stadtbewohner gesehen werden. Hier Abhilfe zu schaffen, gelingt nur durch Maßnahmen, die auf Objekt- und gesamtstädtischer Planungsebene vorgenommen werden. Bewusste Eingriffe in die lokalen Strahlungs- und Energiebilanzen sind dabei wesentliche Größen, die durch Messung und numerische Modellierung quantifiziert werden sollten. Entsprechende Ergebnisse sind in möglichst großmaßstäbigen Klimafunktions- und Planungshinweiskarten zu dokumentieren, wie sie für das Ruhrgebiet²⁹ und japanische Städte³⁰ nach standardisiertem Aufbau erstellt wurden³¹, um nach Lokalisierung klimatischer und lufthygienischer Belastungsräume („hot spots“) entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten können. Generell gilt es, die Auswirkungen des Klimawandels auf städtische Gebiete verstärkt zu untersuchen. Hierzu sind

interdisziplinäre Projekte vonnöten, die zu einem umfassenden Verständnis der Wechselwirkungen Stadt-Atmosphäre in den verschiedenen Regionen und unter unterschiedlichen Klimaszenarien beitragen. Das kürzlich erschienene „Handbuch Stadtklima“³², das sich am Beispiel des Ruhrgebiets mit der Anpassung von Städten an den Klimawandel beschäftigt, stellt hierzu eine erste exemplarische Bestandsaufnahme und eine auf andere Ballungsräume übertragbare Handlungsstrategie dar.

Summary

The results of numeric simulation indicate that global climate change will lead to an average rise of about 2 degrees in ambient temperature in the Ruhr area by the end of the century. This increase will have many consequences, including an intensification of the urban heat island effect as a result of an increase in the prevalence of clear, low-wind weather conditions. This will lead not only to greater thermal stress for the population but also to a change in air pollutant concentrations. Among these pollutants, ozone is of special interest, as the ozone concentration will increase with rising temperatures. Preventative urban planning measures should be taken to counteract increased thermal stress and ozone concentrations. These measures include various possibilities, such as the creation of green areas on buildings and parks in cities, reducing energy consumption by more economical use and more efficient thermal insulation and, as a general principle, the provision of reversible shading which would provide the required protection against solar radiation in the summer but would not present an obstacle to solar radiation in the winter.

Anmerkungen

Meinen Mitarbeitern, Herrn Dr. D. Dütemeyer und Herrn Akad. Direktor Dr. A.-B. Barlag, danke ich für die kritische und konstruktive Durchsicht des Manuskripts sowie Herrn Dipl.-Ing. H. Krähe für die Zeichnung der Abbildungen.

- 1) IPCC 2007
- 2) Bundesregierung 2008
- 3) BMWi 2009
- 4) BMWi 2010
- 5) nach IPCC 2007, verändert und ergänzt
- 6) Spekat et al. 2007
- 7) MUNLV 2010
- 8) IPCC 2007
- 9) Spekat et al. 2007
- 10) Groß1996, Jacob und Winner 2009
- 11) Grimmond et al. 2007
- 12) Hupfer und Kuttler, 2006
- 13) UBA 2008
- 14) Souch and Grimmond, 2004; Jendritzky, 2007
- 15) Kuttler 2009b
- 16) BDEW 2009
- 17) Genchi et al. 2003
- 18) Lin et al. 2001; Kuttler und Straßburger 1999
- 19) Melkonyan, pers. Mitt.
- 20) United Nations, 2008
- 21) Heineberg, 2006
- 22) Grimmond et al. 2004, Vogt et al. 2006
- 23) Brandt 2008
- 24) IPCC 2007
- 25) Baede et al. 2008
- 26) Hegger 2009
- 27) Kuttler und Straßburger 1999
- 28) Oswalt und Rieniets 2006
- 29) Barlag und Kuttler 2009
- 30) Moriyama and Takebayashi, 2003
- 31) VDI 3785, Bl.1; 2008
- 32) MUNLV 2010

Literatur:

– Baede, A.P.M.; van der Linden, V., Verbruggen, A. (2008): Glossar. In: Kernautorenteam Synthesericht IPCC. Rajendra K. Pachauri, Andy Reisinger (Hrsg.): Klimaänderung 2007. Synthesericht. – Berlin (Übersetzung von der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle; Original: Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO / UNEP (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report), 86–99.

– Barlag, A.-B., Kuttler, W. (2009): Prima Klima? Stadtklimatologie im Ruhrgebiet. Atlas der Metropole Ruhr. (Hrsg.): Prosek, A., H. Schneider, H.A. Wessel, B. Wetterau, D. Wiktorin, Emons-Verlag, Köln, 194–195.

– Benjamin, M.T., Winer, A.M. (1998): Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. In: Atmos. Environ. 32, 53–68.

– BMWi 2009: Energiebedingte CO₂-Emissionen ausgewählter Länder und Regionen <http://lexikon.bmw.de/BMWi/Navigation/Energie/statistik-und-prognosen.html>

– BMWi 2010: Emissionen von Kohlendioxid, Stickstoffoxiden, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid und Gesamtstaub nach Quellkategorien in Deutschland. <http://lexikon.bmw.de/>

BMWi/Navigation/Energie/statistik-und-prognosen.html

– Brandt, K. (2008): Die ökonomische Bewertung des Stadtklimas am Beispiel der Stadt Essen. Essener Ökologische Schriften, Bd. 25, Westarp-Wissenschaften.

– Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie (DAS) an den Klimawandel. – Beschluss des Bundeskabinetts vom 17. Dezember 2008.

– Genchi, Y., Kikigawa, Y., Kondo, H., Yoshikado, H. (2003): Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. In: Appl. Energy 76, 449–466.

– Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C. (2005): Das NRW-Klima im Jahr 2055. In: LÖBF-Mitteilungen, Nr. 2/2005, 15–18.

– Grimmond, C.S.B., Salmund, J., Oke, T.R., Offerle, B., Lemonsu, B.A. (2004): Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum. In: J Geophys Research, 109(D24101 doi:10.1029/2004JD004936).

– Groß, G. (1996): Stadtklima und Globale Erwärmung. In: Geowissenschaften 14(6), 245–248.

– Hegger, M. (2009): Sonnige Aussichten. Verlag Müller und Busmann

– Heineberg, H. (2006): Stadtgeographie. 3. A. UTB 2166. Paderborn. Schöningh.

– Hörschle, K., Schmidt, H. (1974): Klimatische Wirkung einer Dachbegrünung. In: Garten und Landschaft, Heft 6, 334–337.

– Hupfer, P., Kuttler, W. (Hrsg.) (2006): Witterung und Klima – Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12. Aufl., Teubner.

– IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): The physical basis. Summary for policy makers. Paris. www.ipcc.ch

– Jacob, D.J., Winner, D.A. (2009): Effect of climate change on air quality. In: Atmos. Environ. 43, 51–63.

– Jendritzky, G. (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. – In: Endlicher, W., F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Berlin, Potsdam, 108–118.

– Kuttler, W., Straßburger, A. (1999): Air pollution measurements in urban parks. In: Atmos. Environ. 33, 4101–4108.

– Kuttler, W. (2009a): Zum Klima im urbanen Raum. – In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Klimastatusbericht 2008, Offenbach/M., 6–12.

– Kuttler, W. (2009b): Klimatologie. UTB 3099. F. Schöningh, Paderborn.

– Lin, C.Y.C., Jacob, D.J., Fiore, A.M. (2001): Trends in exceedances of the ozone air quality standard in the continental United States, 1980–1998. In: Atmos. Environ. 35, 3217–3228.

– Moriyama, M., Takebayashi, H. (2003): "Urban environmental climate MAP" as a countermeasure of urban heat island. ICUC 5, 451–454.

– MUNLV -Minist. f. Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (Hrsg.) (2010): Handbuch Stadt-

klima – Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel (Langfassung). Düsseldorf.

– Oswalt, P., Rieniets, T. (2006): Atlas of Shrinking Cities. Hatje Cantz Verlag, Ostfildern.

– Roloff, A.; S. Bonn; S. Gillner (2008): Klimawandel und Baumartenwahl in der Stadt – als Straßenbäume geeignete Arten. Allg. Forstztschr. / Der Wald 63, 398–399.

– Souch, C., Grimmond, S. (2004): Applied Climatology: heat waves. In: Phys. Geography 28, 599–606.

– Spekat, A., Enke, W., Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRESzenarios B1, A1B und A2. – Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 204 41 138, Januar 2007.

– UBA (2008): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Forschungsbericht 201 41 253, UBA-FB 000844. Umweltbundesamt Dessau.

– United Nations (2008): Department of Economic and Social Affairs. Population Division. www.unpopulation.org

– VDI 3785, P.1 (2008): Environmental meteorology. Methods and presentation of investigations relevant for planning urban climate. December 2008.

– Vogt, R., Christen, A., Rotach, M.W., Roth, M., Satyanarayana, A.N.V. (2006): Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a Central European city. In: Theor. Appl. Climatol. 84, 117–126.

Der Autor

Wilhelm Kuttler studierte Physische Geographie mit Schwerpunkt Meteorologie und Klimatologie sowie Biologie an der Ruhr-Universität Bochum. Im Jahre 1978 erfolgte die Promotion über ein human-biometeorologisches Thema, 1984 die Habilitation zum Thema „Raum-zeitliche Analyse atmosphärischer Spurenstoffeinträge in Mitteleuropa“. 1986 wurde der Lehrstuhl für Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie im Institut für Ökologie an der damaligen Universität Gesamthochschule Essen aufgebaut. Der Autor hat an der Bearbeitung verschiedener VDI-Richtlinien mitgewirkt und ist Vorsitzender des Ausschusses Klima des Fachbereichs II Umweltmeteorologie in der Kommission Reinhaltung der Luft. Seit Januar 2010 ist er zudem Vorsitzender des Zweigvereins Rheinland der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG). Seine Forschungsgebiete sind: Mikro- und Mesoklimatologie unter besonderer Berücksichtigung der angewandten Stadtklimatologie. Vom Autor liegen verschiedene Lehrbücher und zahlreiche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften vor.