

REVIEW

Open Access

Climate change in urban areas. Part 2, Measures

Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen

Wilhelm Kuttler*

Abstract

Part 2 presents measures at the city scale, which are distinguished into object- and area-related means. The former ones include emission reduction, energy gaining and saving, as well as the climate-improving impact of rooftop and façade greening. Area-related means refer to the reduction of radiation temperature through shading and transpiration as well as impact of urban green areas of different size on the urban climate. Furthermore the opportunities to use subsurface urban heat island as an energy-reservoir for cooling or heating are discussed.

Keywords Urban measures, urban climate, global climate change, mitigation, adaptation, urban greening, oasis effect, subsurface heat island, geothermal potential of urban heat island

Zusammenfassung

In Teil 2 werden anhand verschiedener Beispiele Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel auf lokaler, insbesondere städtischer Ebene, vorgestellt. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Möglichkeiten, trockener Hitze und hohen Strahlungsintensitäten durch Beschattung, aber auch durch Aufhellung von Oberflächen zu begegnen. Dabei wird zwischen objekt- und flächenbezogene Maßnahmen unterschieden. Eine besondere Rolle nimmt hierbei die Begrünung von Straßenschluchten und Gebäuden ein. Auch wird exemplarisch untersucht, ob eine Nutzung der urbanen Untergrundwärmeinsel als Energieträger sinnvoll ist.

Einleitung

Nachdem in Teil 1 dieses zweiteiligen Beitrags [1] der globale Treibhauseffekt mit seinen projizierten Wirkungen auf das urbane Klima und die Luftqualität an Beispielen aus dem Ruhrgebiet erläutert wurde, stellt Teil 2 Maßnahmen auf städtischer Ebene vor. Unterschieden wird dabei zwischen objekt- und flächenbezogenen Vorkehrungen. Zu Erstgenannten zählen Möglichkeiten der Abgasreduzierung, der Einsparung und Gewinnung von Energie sowie der klimaverbessernden Wirkung von Gebäudebegrünungen. Unter den flächenbezogenen Maßnahmen wird auf die Reduktion der Strahlungstemperaturen durch Beschattung eingegangen, die Wirkung unterschiedlich großer innerstädtischer

Grünflächen auf das Stadtklima diskutiert und auch die Frage aufgeworfen, welche Möglichkeiten es gibt, die städtische Unterflurwärmeinsel als Energiereservoir zu Kühl- und Heizzwecken zu nutzen.

Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel sollten insbesondere in Städten ergriffen werden, da diese trotz ihres geringen Anteils an der Landoberfläche der Erde als die stärksten Nettoquellen anthropogenen Kohlendioxids gelten [2,3,4].

Mit dem Klimawandel wird unter anderem ein globaler Temperaturanstieg verbunden sein, der allerdings regional hinsichtlich seiner Wirkungen sehr unterschiedlich ausfallen kann [5]. Für Mitteleuropa und damit auch für das Ruhrgebiet kann die prognostizierte Erhöhung der Wintertemperaturen zum Beispiel eine seltenere Beseitigung von Schnee und Eis in den Städten als positive Wirkung zur Folge haben. Vor allem dürfte der Energieaufwand für die Beheizung von Gebäuden niedriger ausfallen als bisher, wodurch CO₂-Emissionen eingespart werden können.

*Correspondence: wiku@uni-due.de

Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, Fakultät für Biologie, Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie, Schützenbahn 70, D-45127, Essen, Germany

Diesen durchaus positiven Seiten des Klimawandels stehen jedoch Nachteile (siehe auch Teil 1 [1]) gegenüber, die in einer

- höheren thermischen Belastung für den Menschen im Sommer
- Zunahme des sommerlichen Kühlbedarfs von Gebäuden
- stärkeren Verbreitung von Krankheitsüberträgern (Mücken, Zecken) und allergieauslösenden Pflanzen (zum Beispiel Ambrosia) sowie
- durch Starkregen verursachten Hochwasser- und Überschwemmungsgefahr

zu sehen sind.

Mit geeigneten Maßnahmen der Objekt- und Stadtplanung kann insbesondere der in dicht bebauten Stadtquartieren verstärkt auftretenden Überwärmung begegnet werden. Dabei wird meist auf zwei Strategien zurückgegriffen, die mit den bekannten Schlagwörtern „Mitigation“ und „Adaptation“ beschrieben werden. Auf beide Strategien wird nachfolgend näher eingegangen.

Unter Mitigation (Abschwächung) wird allgemein das Bemühen verstanden, die Quellstärke der Treibhausgase zu verringern, die Aufnahme von CO₂ durch Vergrößerung der Vegetationsflächen zu erhöhen und dessen technische Sequestrierung (Verbringung von komprimiertem CO₂ in unterirdische Kavernen) rasch zu realisieren. Derartige Maßnahmen führen zu einer Reduzierung dieses Treibhausgases in der Atmosphäre [5].

Darüber hinaus sind Vorkehrungen zu treffen, die die Auswirkungen des Klimawandels reduzieren. Diese unter dem Begriff Adaptation (Anpassung) zusammengefassten Maßnahmen sollen „die Empfindlichkeit natürlicher und menschlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung verringern“ [6].

Da sich zum Beispiel der sich zukünftig verstärkende thermische Stress in Städten im Wesentlichen auf die sommerlichen Hitzeepisoden beschränkt, sollten ausschließlich hiergegen Maßnahmen ergriffen werden und nicht durch permanente Beschattung eine gewünschte winterliche Wärmeaufnahme von Gebäuden durch die Sonnenstrahlung verhindert werden.

Thermische Belastungen können durch trockene Hitze oder feucht-heiße Witterungsabschnitte verursacht werden. Während Erstgenannte meist eine autochthone klimatische Ursache hat, sind feucht-heiße Witterungsabschnitte überwiegend durch allochthone Einflüsse charakterisiert. Wegen ihres makroskaligen Charakters lässt sich deshalb „schwüle“ Hitze mit Mitteln der Stadtplanung kaum bekämpfen, während gegen trockene Wärmebelastung lokale Maßnahmen ergriffen werden können [7]. So sollten zur Vermeidung unerwünschter starker solarer Einstrahlung Gebäude, Straßen und Plätze

sowohl ausreichend beschattet werden als auch durchlüftungswirksam gestaltet sein, um zum Beispiel durch Advektion nächtlicher kühler Umlandluft („Flurwind“, Kaltluftflüsse [8,9]) überwärmte Innenstädte zu kühlen. Entsprechende thermische Minderungsmaßnahmen sollten nicht nur am Objekt, zum Beispiel an Gebäuden erfolgen, sondern auch flächenwirksam, in Stadtquartieren, realisiert werden, wie in entsprechenden Forschungsprojekten (ExWoSt, Experimenteller Wohnungs- und Städtebau [10]; dynaklim, Dynamische Anpassung an den Klimawandel der Emscher-Lippe-Region [11]) untersucht wird. Auf ausgewählte Beispiele wird nachfolgend näher eingegangen.

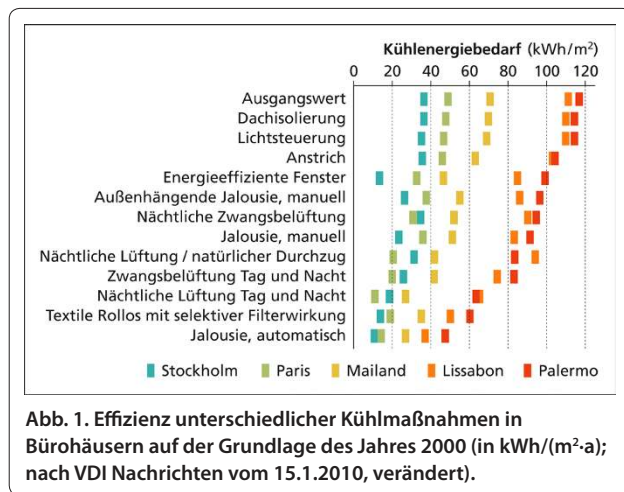
Objektbezogene Maßnahmen

Wesentliche Maßnahmen zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes sollten unter den Bedingungen des mitteleuropäischen Klimas grundsätzlich in einem sparsameren Umgang mit der zu Heiz- und Kühlzwecken von Gebäuden aufzuwendenden Energie sowie einer effizienten Wärmedämmung gesehen werden.

Energieeinspar- und Energiegewinnungsmaßnahmen

Energieeinsparmaßnahmen an Gebäuden werden nachfolgend exemplarisch erörtert. So sind die spezifischen Heizenergieverbräuche zum Beispiel in Deutschland gegenwärtig noch viel zu hoch, da ein großer Teil der überwiegend alten Bausubstanz, so auch im Ruhrgebiet, bisher nicht über einen effektiven Wärmeschutz verfügt. Der Heizenergieverbrauch einer Wohnung mit einer Wohnfläche von 100 m² bis 250 m² sollte in dieser Klimaregion weniger als 100 kWh/(m²·a) betragen. Nach wie vor überschreiten die mittleren Verbräuche jedoch mehr als 200 kWh/(m²·a) [12].

Durch den Bau von Passivhäusern werden mit 10 bis 15 kWh/(m²·a) gegenwärtig schon sehr niedrige spezifische Wärmeverbräuche erreicht. Noch besser stellen sich die Bilanzen von sogenannten Plus-Energie-Häusern dar, die in der Jahressumme mehr Energie produzieren als sie verbrauchen und dadurch eine positive Energiebilanz aufweisen. Erst dadurch dürfte zum Beispiel der Betrieb eines Elektrofahrzeugs interessant werden, da die dazu benötigte Energie ohne Rückgriff auf CO₂ emittierenden Kraftwerksstrom erzeugt wird. Der Energiegewinn eines Plus-Energie-Hauses wird nicht nur durch geschickte Anbringung von Photovoltaikpaneelen an den Hauswänden und auf dem Dach sowie einer effizienten Nutzung von Wärmepumpen erreicht, sondern auch durch die Verwendung von hochwärmedämmenden, luftdichten Bauteilen für die Wände mit einer geregelten Lüftung der Innenräume sowie durch Wärmerückgewinnung. Diese Haustypen, von denen es bereits einige wenige Modellhäuser gibt (zum Beispiel von der



Universität Darmstadt [13]), befinden sich allerdings noch in der Experimentalphase.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass der energetische Aufwand, Gebäude in den Innenstädten im Sommer zu kühlen, wegen des städtischen Wärmeinseleffektes höher ist als bei vergleichbaren Häusern im Umland. So wird in Bürogebäuden der Londoner Innenstadt bei heißer Witterung 16 % mehr Energie zur Kühlung aufgewendet als bei Vergleichsgebäuden im Umland [14]. Dabei lässt sich der zur Kühlung aufzuwendende Energiebetrag durch verschiedene – insbesondere auch passive – technische Möglichkeiten deutlich reduzieren (Abb. 1).

Hierzu wird exemplarisch der Kühlenergiebedarf eines Bürogebäudes in Mailand dargestellt, wo gegenwärtig diejenigen mittleren klimatisch-thermischen Verhältnisse herrschen, die für das Ruhrgebiet im Jahre 2100 projiziert werden (entsprechend einer Zunahme der Jahresmitteltemperatur von +2,5 K; siehe Teil 1 [1]). Unter der Annahme eines Ausgangswertes für den sommerlichen Kühlenergiebedarf von etwa 70 kWh/(m²-a) [15] wurde untersucht, welche Technik den Energieverbrauch am effizientesten verringern kann. Als wirksamste Einzelmaßnahme erwiesen sich die je nach Bestrahlungsstärke automatisch gesteuerten Jalousien sowie nächtliche Lüftung, die den Kühlenergiebedarf jeweils um 60 % absenkten. Außenliegende Jalousien sind im Vergleich zu innenliegenden Verschattungsmöglichkeiten grundsätzlich als effizienter anzusehen, weil bei erstgenannten der größte Teil des Strahlungsumsatzes außerhalb des Gebäudes erfolgt, während bei auf der Innenseite von Fenstern angebrachten Jalousien der wesentliche Strahlungsumsatz auf der Innenraumseite erfolgt, wodurch es zu einer vergleichsweise stärkeren Erwärmung der Innenräume kommt.

Aufdachanlagen für die Photovoltaik (PV) führen neben der bekannten Produktion von elektrischer

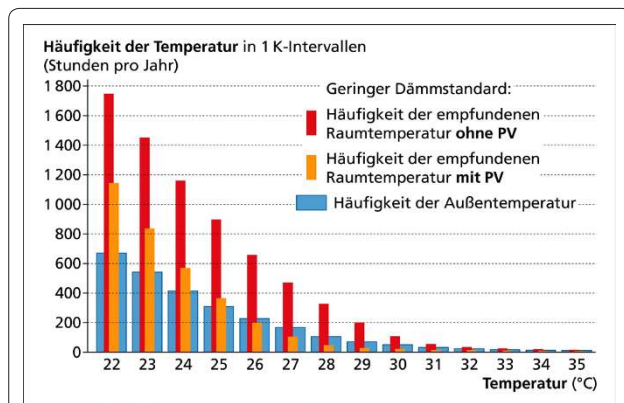


Abb. 2. Numerische Simulation des Einflusses eines Photovoltaikdaches (PV) auf die Innenraumtemperatur einer Dachwohnung in Wuppertal (Quelle: [16], verändert)¹⁾.

¹⁾Grundlage der Modellrechnung: heißer Sommer auf der Basis des Testreferenzjahres ($t_{max} = 32,9\text{ °C}$) in Wuppertal; empfundene Raumtemperatur errechnet sich zu je 50 % aus der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur aller Raumumschließungsflächen; PV-Dach: $\alpha = 0,53$; Dachziegel: $\alpha = 0,70$.

Energie auch zur Beschattung des darunter liegenden Daches. Hierdurch kann zum Beispiel die empfundene Raumtemperatur einer gut gedämmten Dachgeschoßwohnung um bis zu 2 K im Vergleich zu einer entsprechend gedämmten Dachwohnung ohne PV reduziert werden (Abb. 2). Auch wird die Häufigkeit der Jahrestunden mit Temperaturen > 26 °C bei Vorhandensein eines PV-Daches auf etwa ein Viertel der Zeit deutlich verringert [16].

Während eine Aufdach- PV-Anlage zu einer wirkungsvollen Beschattung einer Dachgeschoßwohnung führen kann, stellt sich die Frage nach der produzierten Strommenge durch PV-Elemente. Als Beispiel mögen „Stromerntewerte“ dienen, die von einer im mittleren Ruhrgebiet (Essen, etwa 1400 Sonnenstunden im langjährigen Mittel [17]) betriebenen Anlage (Dächer des Betriebshofs der Essener Verkehrs AG, Fläche 1.000 m², 25 °nach S geneigt) im zweijährigen Mittel (2005/2007) produziert wurden. Die Anlage wies eine mittlere Leistungsdichte von 11 W/m² auf und stellte durchschnittlich 96 kWh/(m²-a) an elektrischer Energie bereit. Setzt man dazu die jeweils pro Quadratmeter erhaltene solare Einstrahlung der nahegelegenen Klimastation der Universität Duisburg-Essen in Beziehung, so resultiert eine „Umsetzungsrate“ von etwa 10 %. Das bedeutet, dass die Gewinnung von elektrischem Strom unter den genannten solaren Bedingungen der geographischen Breite des Ruhrgebiets offensichtlich dann sinnvoll erscheint, wenn es sich um großflächige Anlagen handelt.

Direkte Maßnahmen, die Oberflächenenergiebilanzen im Sinne einer geringeren Aufheizung im Sommer zu beeinflussen, können auch darin bestehen, helle,

reflektierende Materialien für Außenwände zu verwenden. Dies führt über eine Absenkung der Oberflächentemperaturen nicht nur zu einer Reduzierung der langwelligen Wärmestrahlung (L_{\uparrow}) und Wärmeleitung (λ), sondern auch zu einer Verringerung der turbulenten sensiblen Wärmestromdichte (Q_H) und damit der Lufterwärmung. Das wird anhand eines Vergleichs der maximalen Oberflächentemperaturen einer baugleichen weißen und schwarzen sonnenbeschienenen Westwand eines Gebäudes deutlich: Unter stärkster Bestrahlung erreicht die schwarz angestrichene Wand eine Maximaltemperatur von 65 °C, eine weiße Wand hingegen nur 40 °C (Temperaturangaben nach [18]). Die darauf beruhende langwellige Ausstrahlung ($\epsilon = 1,0$) beläuft sich für die schwarz gestrichene Wand auf $L_{\uparrow} = 740 \text{ W/m}^2$, für den weißen Anstrich auf nur $L_{\uparrow} = 540 \text{ W/m}^2$. Würde diese Differenz von 200 W/m^2 über 5 Stunden pro Tag und an 30 Sommertagen pro Jahr bestehen und eine Stadtfläche von 1 km^2 betreffen, dann strahlten derartig weiße Flächen $3 \cdot 10^7 \text{ kWh}$ weniger an Energie aus als ein vergleichsweise schwarzer Untergrund. Das wäre etwa so viel, wie 7.500 deutsche Normfamilien (4 Pers. Haushalt, 4.000 kWh/a) pro Jahr an Energie verbrauchten. Hieraus ersieht man, in welchem Maße allein eine Aufhellung von Oberflächen die objektbezogene und letztlich – unter Zugrundelegung einer Vielzahl derartiger Gebäude – auch die städtische und damit flächenbezogene Energiebilanz positiv beeinflussen kann. Allerdings können helle Anstriche durch ihre verstärkte Reflexion des Sonnenlichts zu zusätzlichen, letztlich unerwünschten Bestrahlungen von Flächen führen, die im Schatten liegen und der direkten Sonnenbestrahlung nicht ausgesetzt sind.

Doch nicht nur im kurzwelligen Bereich kann durch Erhöhung des reflektierten Anteils die Absorption verringert werden, sondern auch im langwelligen Bereich, wenn Oberflächen mit einer speziellen Beschichtung bzw. einem Anstrich versehen wurden, die zum Beispiel im nahen Infrarot reflektieren. Wegen ihrer temperatur-senkenden Wirkung werden derartige Oberflächenbehandlungen treffenderweise auch „cool colours“ genannt. Wie Abb. 3 zeigt, ist die Reflexion im langwelligen Bereich ($\lambda > 750 \text{ nm}$) um bis zu 60 % höher als an Oberflächen, die nicht beschichtet wurden.

Aufgrund der stärkeren Reflexion im nahen Infrarot reduziert sich die Temperatur der Cool Colours Oberfläche um bis zu 6 K im Vergleich zur Standardoberfläche während höchster solarer Einstrahlung (Abb. 4). Dadurch, dass eine derartig beschichtete Oberfläche tagsüber weniger warm wird als eine Standardoberfläche, dringt nicht nur weniger Energie durch Wärmeleitung (λ) in die entsprechende Hauswand ein, sondern auch deren langwellige Ausstrahlung wird um bis zu $L_{\uparrow} = 50 \text{ W/m}^2$ vermindert.

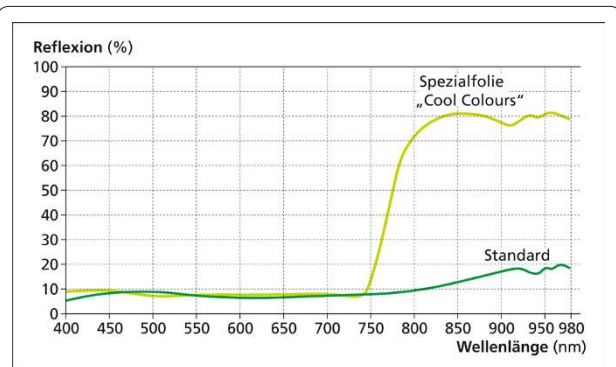


Abb. 3. Wellenlängenabhängige Reflexion zweier Oberflächen (Standard, d. h. nicht beschichtet ; „cool colours“, mit langwellig reflektierender Folie beschichtet) (Quelle: [62], verändert, hier nach [63]).

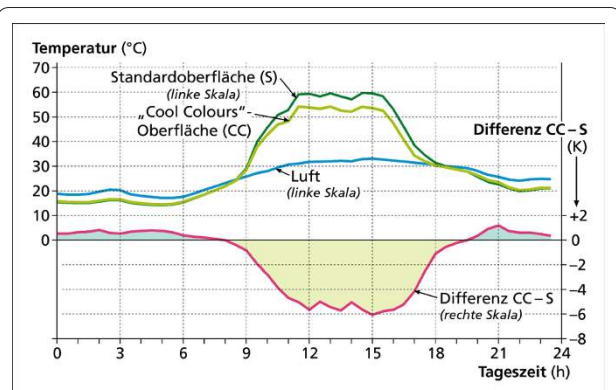
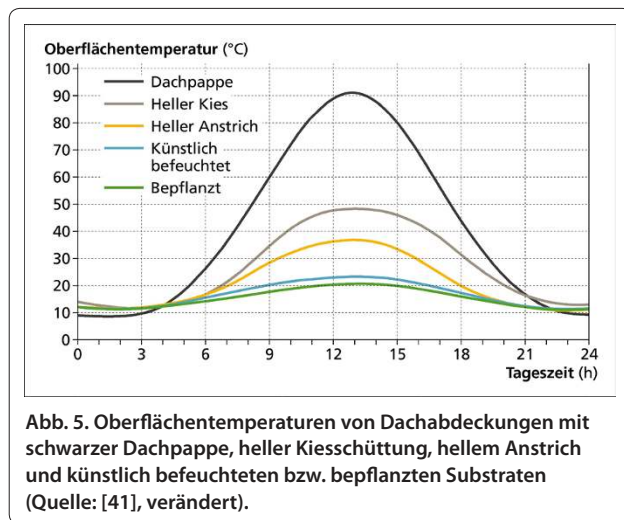


Abb. 4. Tagesgang der Temperaturen der Luft, einer Standardoberfläche (S), einer „Cool Colours“ Oberfläche (CC) und deren Differenz (CC - S) an einem Strahlungstag in Essen (26. 6. 2010)¹⁾ (Quelle: P. Wagner, pers. Mitt.). ¹⁾Standort: Klimastation der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen.

Gebäudebegrünung und ihre energetische Wirkung

Begrünungen von Gebäuden weisen in mikroklimatischer und lufthygienischer Hinsicht zahlreiche Vorteile auf. Hierzu zählen bei starker Einstrahlung eine Absenkung der Gebäudeoberflächen- und der Lufttemperaturen der unmittelbaren Umgebung [19] sowie eine Verringerung der Spannweite der Tagesschwankung der Temperatur mit schonender Wirkung auf das Baumaterial und eine Erhöhung der hauswandnahen Luftfeuchtigkeit. Im Winter kann immergrüner Bewuchs wie Efeu vor Wärmeverlust des Gebäudes schützen.

Die relativ große pflanzliche Oberfläche führt zur Ab- und Adsorption atmosphärischer Spurenstoffe, wodurch es in Gebäudenähe meist zu einer Verbesserung der Luftqualität kommt. Bei der Realisierung von Bepflanzungen an Gebäuden sollte daher immergrüne Vegetation verwendet werden, da diese Jahreszeiten



unabhängig die Gebäudeenergiebilanz verbessert und Luftverunreinigungen effektiver aufnimmt als sommergrüne Vegetation [20].

Am Beispiel verschiedener Dachabdeckungen soll die Strahlungstemperatur reduzierende Wirkung eines begrünten Daches während starker sommerlicher Einstrahlung belegt werden (Abb. 5). So erreicht schwarze Dachpappe zur Zeit des Sonnenhöchststandes kurzfristige Temperaturen von über 90 °C. Deutlich niedrigere Werte werden für helle, trockene Kiesschüttungen sowie hellen Anstrich gemessen. Die niedrigsten Werte erreichen allerdings feuchte und besonders bewässerte und bepflanzte Dachflächen. So besteht zwischen letztgenannten und der schwarzen Dachpappenabdeckung zur Mittagszeit ein Temperaturunterschied von bis 70 K. Zwar führen helle Anstriche bereits zu deutlich reduzierten Strahlungstemperaturen ($t_{\max} = 35 \text{ °C}$), bei bepflanzten, gut bewässerten Substraten kann jedoch im Vergleich zu hellen Oberflächen noch eine um etwa 15 K stärkere Reduktion der Strahlungstemperatur erzielt werden. Der Unterschied der Maximumtemperaturen zwischen den künstlich befeuchteten sowie den bepflanzten und bewässerten Substraten dürfte letztlich nicht nur auf den Transpirationsvorteil der Vegetation zurückzuführen sein, sondern auch auf den unterschiedlichen thermischen Eigenschaften beruhen, die Wasser und Vegetation hinsichtlich der Wärmeleitung (λ) und Wärmekapazitätsdichte (ζ) zu eigen sind. Festzustellen bleibt, dass bepflanzte und bewässerte Dächer zu den wirkungsvollsten oberflächentemperatursenkenden Maßnahmen insbesondere dann zählen, wenn während maximaler Einstrahlung die größte Abkühlung erwünscht ist. Des Nachts weisen sämtliche Dachabdeckungen niedrige Oberflächentemperaturen auf und gleichen sich thermisch weitgehend an.

Auch im Jahresverlauf wirkt sich eine Dachbegrünung in Hinblick auf den Wärmetransport durch die Gebäudeumschließungsflächen positiv aus. Vergleicht man dazu die entsprechenden Wärmeleitfähigkeitswerte eines bepflanzten („Gründach“) und eines nicht bepflanzten Daches („Betondach“) miteinander, so zeigt sich (Tabelle 1), dass beim „Gründach“ die gesamten mittleren täglichen Wärmetransporte während Strahlungswetterlagen zu den Sommer- und Winterterminen negativ sind. Das bedeutet, dass Energie vom Dach an die Atmosphäre abgegeben wird, im Winter vergleichsweise mehr als im Sommer.

Das trockene „Betondach“ hingegen nimmt in der Tagesgesamtbilanz während des Sommers und des Herbstes bei hoher Einstrahlung Wärme auf (positives Vorzeichen) und führt diese auch dem Gebäudekern zu. So werden durch das Betondach tagsüber (8. Juli) fast 50 W/m² in das Gebäude transportiert, während das „Gründach“ zur gleichen Zeit sogar um bis zu 2,5 W/m² abgibt.

Dadurch erhöht sich die Raumtemperatur des Gebäudes mit „Betondach“ um 2-3 K gegenüber der des Gebäudes mit „Gründach“ [21]. Sollte diese Temperaturdifferenz beispielsweise durch eine elektrisch betriebene Klimaanlage ausgeglichen werden, wäre hierzu ein erheblicher Energieaufwand notwendig. Im Winter (10. Jan.) verlieren beide Dächer Wärme. Dabei kühlt sich das „Betondach“ jedoch um über 35 % stärker ab als das „Gründach“. Nachts strahlt das „Betondach“ sogar bis zu sieben Mal mehr Energie aus als das „Gründach“. Es zeigt sich, dass bepflanzte Dächer einen guten Wärme-/Kälteschutz bieten, wodurch Kühl-/Heizenergie für darunter liegende Räume je nach Jahreszeit in nicht unerheblichem Maße eingespart werden kann.

Auch in Bezug auf den Wasserhaushalt weisen begrünte Dächer Vorteile gegenüber nicht begrünten auf. So zeigt ein entsprechender Vergleich zwischen einem „Grün“- und einem „Kiesdach“ in Karlsruhe [22], dass bei einer jährlichen Niederschlagssumme von 750 mm bei einem Kiesdach mit bis zu 20 % der Niederschlagsmenge nur ein geringer Teil verdunstet, während vom bewässerten „Gründach“ über 90 % des Wassers über den latenten Wärmestrom (Q_E) in die Atmosphäre abgeführt werden. Allerdings muss dazu der Substratuntergrund eine ausreichende Mächtigkeit aufweisen (in diesem Fall 40 cm), wodurch rund 150 mm Niederschlagswasser gespeichert werden können, was etwa der durchschnittlichen Niederschlagssumme zweier Monate entspricht. Dadurch wird gerade auch bei Starkregenereignissen, die in Zukunft häufiger auftreten sollen, der Spitzenabfluss in die Kanalisation nachhaltig vermindert.

Sollen „Gründächer“ neben ihren unbestreitbaren klimatischen und hydrologischen Vorteilen für das

Tabelle 1. Mittelwerte des Wärmetransportes (in MJ/m²) durch eine Dachgeschossdecke bei begrüntem („Gründach“) und nicht begrüntem Dach („Betondach“)¹ an Strahlungstagen für Tages-, Nacht- und Tagesgesamtsommen (Juli 1987 – Juni 1988; Quelle: [21], verändert)

	Juli 8	Aug. 2	Aug. 15	Sept. 6	Sept. 20	Okt. 4	Nov. 7	Dez. 20	Jan 10
"Gründach"									
Tagessumme (24 h)	-0.39	-0.39	-0.42	-0.07	-0.52	-0.76	-1.28	-1.35	-1.01
Tag (12 h)	-0.22	-0.20	-0.30	-0.05	-0.16	-0.52	-0.75	-0.77	-0.66
Nacht (12 h)	-0.17	-0.19	-0.13	-0.02	-0.36	-0.24	-0.53	-0.57	-0.35
"Betondach"									
Tagessumme (24 h)	1.35	1.22	1.11	0.95	0.17	0.15	-1.04	-1.40	-1.38
Tag (12)	4.06	4.05	3.66	3.42	3.15	2.83	1.35	0.55	0.99
Nacht (12 h)	-2.71	-2.83	-2.55	-2.47	-2.98	-2.68	-2.39	-1.95	-2.37

¹Pflanzensubstrat: 10 cm Steinwolle; Nicht begrünte Kontrolldecke: Beton; Vegetation: 43 Arten verschiedener Sträucher und Pflanzen mit automatischer Wasser- und Nährstoffversorgung; positive/negative Werte: Wärmeaufnahme/-abgabe

jeweilige Gebäude auch auf Stadtquartiersebene klimaverbessernd wirken, dann sollten möglichst viele, insbesondere niedrige Häuser, entsprechend bepflanzt sein.

Grundsätzlich sollte auch bedacht werden, dass durch die Wasserverdunstung von Gründächern die für den latenten Wärmestrom aufzuwendende Energie natürlich nicht für die Lufterwärmung zur Verfügung steht. Immerhin könnten mit der Energie, die für die Verdunstung von einem Kilogramm Wasser notwendig ist ($q_{v,w} \approx 2,4$ MJ/kg Wasser), 100 m³ Luft um 18 K erwärmt werden.

Die objektbezogenen Maßnahmen sind überwiegend dem Gebäudebesitzer überlassen. In diesem Zusammenhang soll darauf hingewiesen werden, dass Wohnungsbau-gesellschaften eine hohe Verantwortung übernommen haben, entsprechende Empfehlungen umzusetzen, da damit am besten ein kommunaler Flächenbezug hergestellt werden kann. Die derzeit zu beobachteten Massenverkäufe und Privatisierungen des Wohnungsbestandes sind daher aus stadtklimatischer Sicht kritisch zu sehen.

Flächenbezogene Maßnahmen

Unter flächenbezogenen Maßnahmen sollen Eingriffe in die Energiebilanz und den CO₂-Haushalt der städtischen Grenzschicht verstanden werden, die sich von der Größe her auf Stadtteil- bzw. Stadtquartiersebene beziehen.

Reduktion der Strahlungstemperaturen durch Beschattung

Die Wärmebelastung auf Plätzen oder in Straßenschluchten wird durch verschiedene Faktoren bestimmt [23,24]. Hierzu zählen die durch die Bebauung vorgegebenen geometrischen Verhältnisse, deren Einflüsse zum Beispiel über das Haushöhen/Straßenbreitenverhältnis (engl. Height/Width, H/W) oder den

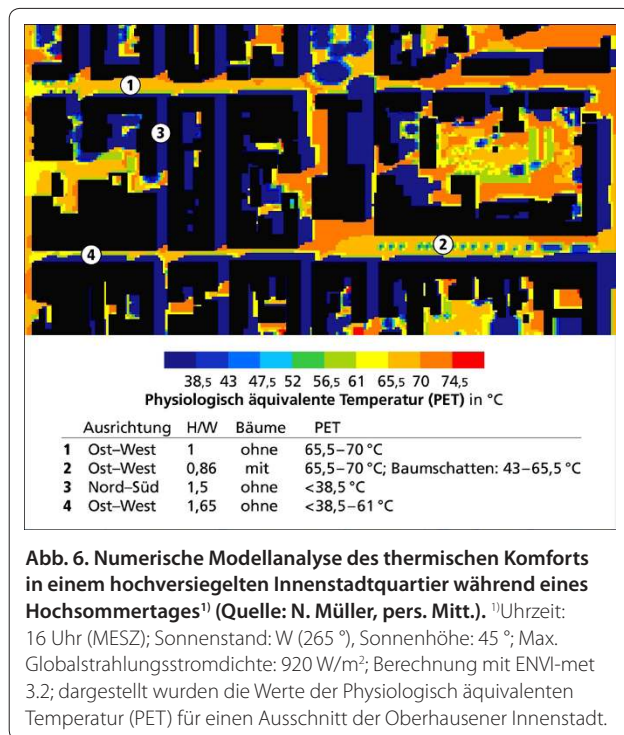
Himmelssichtfaktor (engl. Sky view factor, SVF [25,26]) bestimmt werden können, aber auch die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV), der Durchlüftungsgrad, die Beschattungsmöglichkeiten, die Farbe des Untergrundes [27] sowie dessen Struktur (versiegelt/natürlich). Zur Klassifizierung der thermischen Behaglichkeit stehen seitens der Human-Biometeorologie verschiedene Indices zur Verfügung (eine Zusammenfassung dazu lässt sich zum Beispiel in [28,29,30] finden). Für die Diskussion der nachfolgenden Beispiele wird sowohl auf die mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}), die eine bestimmende Eingangsgröße für alle thermischen Indices darstellt, als auch auf die Physiologisch Äquivalente Temperatur (engl. Physiological Equivalent Temperature, PET) zur Quantifizierung des thermischen Komforts zurückgegriffen. Die Strahlungstemperatur bzw. Strahlungsäquivalenttemperatur ($T_0 \cdot \epsilon^{1/4}$) ist nicht mit der Oberflächentemperatur (T_0) gleichzusetzen, da der Emissionsgrad ϵ meist nicht bekannt ist. Sie berechnet sich vielmehr nach

$$T_0 \cdot \sqrt[4]{\epsilon} = \sqrt[4]{\frac{E}{\sigma}}$$

mit E als Strahlungsflussdichte und σ als Stefan-Boltzmann-Konstante; Näheres siehe [31].

Wegen der relativ engen positiven Korrelation zwischen dem einfach zu ermittelnden SVF und T_{mrt} konnten zum Beispiel in Straßenschluchten ohne Baumbestand (Freiburg/Brsg.) bei einer Zunahme des SVF von 20 % auf 60 % Anstiege der Strahlungstemperaturen von 40 °C auf 60 °C ermittelt werden [7].

Neben der Straßenbreite wirkt sich insbesondere bei sommerlichen Strahlungswetterlagen in Mitteleuropa auch der Straßenverlauf (N/S bzw. E/W) auf den thermischen Komfort aus, der mit Hilfe von PET exemplarisch für ein Innenstadtquartier in Oberhausen numerisch modelliert wurde (Abb. 6).



Der Vergleich der PET- Werte zwischen einer N/S und W/E verlaufenden Straße mit vergleichbar großen H/W-Verhältnissen (Situation 3 und 4 in Abb. 6) zeigt, dass nachmittags die PET-Werte der N/S gerichteten Straße mit weniger als 38,5 °C wesentlich niedriger sind als diejenigen der nördlichen Seite der W/E verlaufenden Straße mit bis zu 61 °C. Interessant ist hieran auch, dass der südliche Teil dieses Straßenzugs wegen der einseitigen Beschattung deutlich niedrigere Werte erreicht als dessen nördliche Seite. Aber auch das unterschiedliche H/W-Verhältnis zweier W/E verlaufender Straßen (Situation 2 und 4) macht sich in der Bestrahlungsstärke und dadurch letztlich im thermischen Komfort bemerkbar: Die relativ breite Straße (Situation 2, H/W = 0,86) weist wesentlich höhere PET-Werte auf als die schmale, schattigere Straße (Situation 4, H/W = 1,65). Darüber hinaus fallen die auf die Baumschatten begrenzten Reduktionen der PET-Werte in Situation 2 auf, die punktförmig die PET-Werte um zwei Klassen verringern und damit den thermischen Komfort – allerdings nur in diesem Bereich - erhöhen.

Diese Untersuchung belegt, dass schmale N/S verlaufende, durch die Häuserreihen beschattete Straßen wesentlich stärker zur Verbesserung des thermischen Komforts beitragen als W/E gerichtete Straßenschluchten, die wesentlich wärmer sind und nur dort kaum thermische Belastungen aufweisen, wo sie – wie im vorliegenden Beispiel - mit schattenspendenden Bäumen bestanden sind.

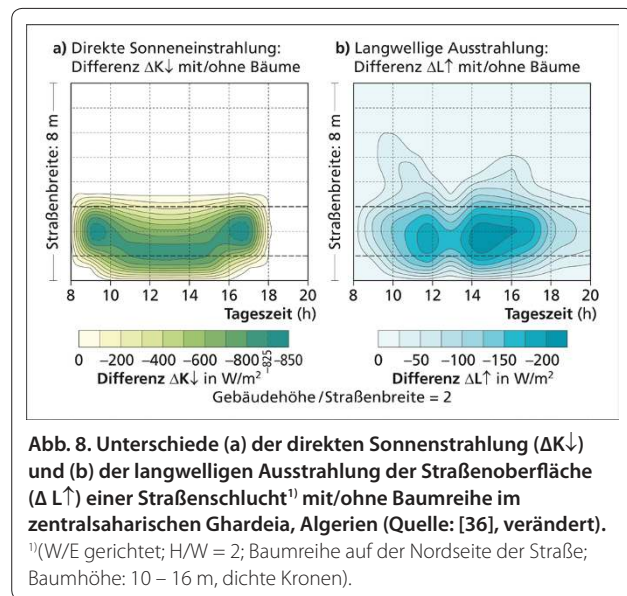
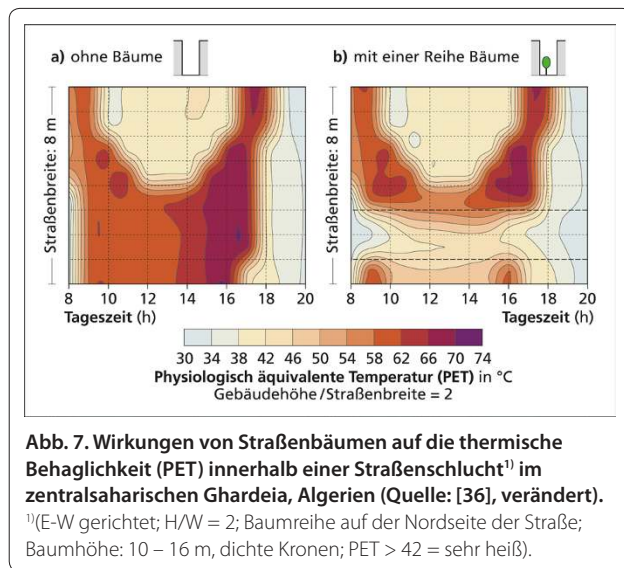
Der Einfluss von Straßenbäumen auf die thermischen Verhältnisse in Straßenschluchten ist allerdings von verschiedenen Faktoren abhängig [24,32]: Unter anderem auch davon, auf welcher Straßenseite Bäume stehen, wie ihre Gestalt, Größe und die Dichte der Kronendächer beschaffen sind. Dabei hat die Größe der Baumkrone einen stärkeren Einfluss auf die jahreszeitlichen Beschattungsverhältnisse als die Dichte des Kronenvolumens. Der Kühleffekt von gut transpirierenden Bäumen wird zu 80 % auf die Beschattung und zu etwa 20 % auf den auf der Evapotranspiration beruhenden latenten Wärmestrom (Q_e) zurückgeführt [33]. Grundsätzlich ist aber auch darauf zu achten, dass Bäume einen optimalen Standort in Bezug auf die zu beschattende Fläche aufweisen [34].

Bäume mit hohen und dichten Kronenblättern sorgen neben der Verbesserung des thermischen Komforts auch für ein angenehmeres Lichtklima sowie für eine Verringerung der langwelligen Strahlungsströme im Stammraumbereich [7].

Auf die Kühlwirkung von Straßenbäumen unter Hitzebedingungen soll anschließend näher eingegangen werden. Dazu wurde in der zentralsaharischen Stadt Ghardeia (Algerien) eine W/E verlaufende, 8 m breite Straße (H/W = 2), die auf ihrer Nordseite eine Reihe von Straßenbäumen aufwies, auf die thermische Behaglichkeit von Passanten untersucht. Wie Abb. 7 entnommen werden kann, wird der thermische Komfort für sich im Schatten aufhaltende Personen wesentlich verbessert, da sich die PET-Werte um bis zu 22 K reduzierten. Dieses ist in erster Linie auf die niedrigeren Strahlungstemperaturen zurückzuführen und weniger auf die Transpiration. Es zeigte sich aber auch, dass außerhalb der Beschattung durch die Bäume nur noch eine geringe Wirkung auf den thermischen Komfort nachzuweisen ist, wie auch in Abb. 6 zu sehen ist. Sowohl die direkte Sonnenstrahlung (K_{\downarrow}) wird während der hellen Tagesstunden in erheblichem Maße durch Bäume reduziert (in diesem Fall um bis zu 850 W/m²; Abb. 8 a) als auch die vom Boden ausgehende langwellige Ausstrahlung (L_{\uparrow}) vermindert (um bis zu 200 W/m²; Abb. 8 b), was wesentlich zur Verbesserung des thermischen Komforts beiträgt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Bäume einen außerordentlich positiven Einfluss auf den thermischen Komfort besitzen [35], was sich allerdings im Wesentlichen auf den Schattenwurf beschränkt.

Selbstverständlich kann Sonnenschutz auch durch den Einsatz künstlicher Materialien bewirkt werden, so durch Arkaden bzw. Galerien [36], durch das Anbringen hintereinander liegender doppelter Fassaden [37], durch Straßen bzw. Plätze abdeckende Planen [38], Markisen oder Sonnenschirme. Die Reduzierung der Strahlungstemperaturen kann hierbei erheblich sein, wodurch der thermische Komfort der Bewohner verbessert und der



Materialermüdung wegen niedrigerer Tagestemperaturspannen sowie der lichtinduzierten Ozonproduktion (siehe Teil 1 [1]) entgegengewirkt werden kann. Hierauf soll mit Verweis auf die entsprechende Literatur jedoch nicht weiter eingegangen werden.

Wirkung innerstädtischer Grünflächen

Innerstädtische Grünflächen können sich – je nach ihrer Größe, Bestandsstruktur und Gestaltung ihrer Ränder – nicht nur positiv auf das Klima [39], sondern auch luftqualitätsverbessernd sowie lärmindernd auswirken (Zusammenstellung in Tabelle 2). Ausschließlich mit Rasen bewachsene Flächen, die häufig als städtisches Grün anzutreffen sind, tragen allerdings zur Verbesserung der stadtklimatischen Verhältnisse tagsüber nur wenig bei, da sie keinen oder kaum Schatten spenden und ihre klimatische Wirkung bei ausreichender Bodenfeuchte überwiegend auf dem durch die Evapotranspiration beruhenden latenten Wärmestrom (Q_E) beruht. Reduktionen der Lufttemperatur über diesen Flächen erreichen im Allgemeinen nur Werte im niedrigen einstelligen Bereich [40]. Auch ad- und absorbieren Rasenflächen nur relativ geringe Mengen an Luftverunreinigungen, da die Depositionsgeschwindigkeiten (v_d) von Rasenflächen nur niedrige Werte im Vergleich zu anderer Vegetation erreichen [20,41].

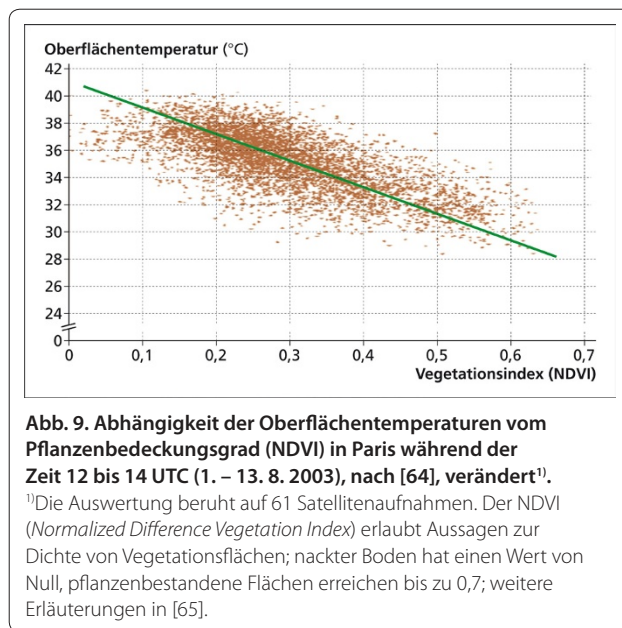
Wesentlich stärkere Auswirkungen in Hinblick auf eine Verbesserung der thermischen und lufthygienischen Verhältnisse weisen hingegen Sträucher, insbesondere aber hohe schattenbringende Bäume auf, die zum Beispiel auf Rasenflächen wachsen [42]. Diese bewirken bei starker Einstrahlung einen Rückgang der Oberflächentemperaturen durch Beschattung im meist zweistelligen Temperaturbereich, wodurch eine

erhebliche Abkühlung erreicht werden kann [43]. Einen entsprechenden Zusammenhang zwischen der Vegetationsdichte und der Reduktion der Oberflächentemperaturen, die auf Beschattung beruht, zeigt Abb. 9. Hiernach nimmt die Temperatur bei Zunahme des NDVI-Indexes mit etwa 2 K/0,1 NDVI-Einheit ab. Die durch die natürliche Beschattung und Transpiration verursachten niedrigeren Temperaturen können darüber hinaus zum Beispiel die Betriebskosten für den Einsatz von Gebäudeklimaanlagen [44,45] senken.

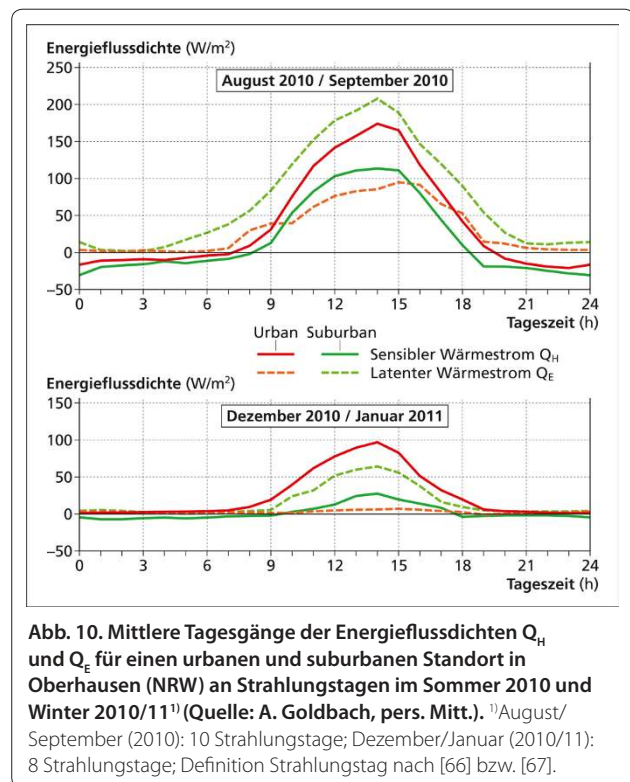
Die positive thermische Wirkung von Grünflächen zeigt sich im Vergleich zu versiegelten Flächen auch bei der Gegenüberstellung der turbulenten Flüsse des sensiblen und latenten Wärmestroms (Q_H , Q_E) für Strahlungswetterlagen. Wie Abb. 10 zu entnehmen ist, dominiert am Stadtstandort sowohl im Sommer als auch im Winter der turbulente sensible Wärmestrom (Q_H), während am begrünten und wasserversorgten Umlandstandort (baumbestandene Rasenflächen) der turbulente latente Wärmestrom jeweils höhere Werte erreicht. Das Bowenverhältnis ($Bo = Q_H/Q_E$) beläuft sich am Stadtstandort im Sommer auf $Bo = 1,8$, im Winter auf $Bo = 21,4$. Hieraus kann der Schluss gezogen werden, dass wegen der eingeschränkten Verwendung oder gar des Fehlens von Wasser wesentlich mehr Energie für die Lufterwärmung als für die Verdunstung aufgewendet wird. Demgegenüber erreichen die Bo -Werte am suburbanen Standort sowohl im Sommer als auch im Winter mit $Bo \approx 0,5$ erwartungsgemäß zum Teil deutlich niedrigere Werte. Bezieht man den Anteil von Q_E auf die Strahlungsbilanz Q^* , so zeigt sich, dass am urbanen Standort im Sommer 23 %, im Winter sogar nur 4 % der Energie mangels Wassers über die Verdunstung

Tabelle 2. Klimatische und lufthygienische Auswirkungen von Grünflächen sowie Gestaltungsempfehlungen in Stadtgebieten (zus.gestellt nach versch. Verf.)

- Reduktion der Oberflächentemperaturen und der Lufttemperaturen durch Beschattung und Evapotranspiration ($q_{v,20^\circ\text{C}} \sim 2,4 \text{ MJ/kg}$)
- Wesentlich höhere Vermeidung der CO_2 - Produktion in der Stadt durch Stadtbäume im Vergleich zu Waldbäumen (ein urbaner Schattenbaum entspricht in seiner CO_2 - reduzierenden Wirkung mehreren Waldbäume)
- Generierung eines angenehmen Lichtklimas
- Reduktion der Windgeschwindigkeit; dadurch Möglichkeit der Spurenstoffdeposition an der Pflanzenoberfläche (insbesondere Stäube), jedoch auch Gefahr der atmosphärischen Schadstoffakkumulation („Tunnelbildung“ in Straßenschluchten)
- Kaum Reflexion im kurzwelligen Bereich; deshalb Straßenbäume geeignet als „UV-Sperre“ in Straßenschluchten für Fußgänger
- Verminderung von Abflussspitzen nach Starkregen wegen Interzeptionsverdunstung und zeitversetzter Versickerung von Niederschlagswasser im Boden
- Senken des Ozonbildungspotentials durch niedrige Umgebungstemperaturen
- Große Flächen sollten nach dem „Savannenprinzip“ bepflanzt werden: Rasen und eingestreute großkronige schattenspendende Bäume
- Grünschnitten sollten raugkeitsarm gestaltet und möglichst untereinander verbunden sein
- Innerstädtische oder stadtnah gelegene Flächen mit „Energiepflanzen“ (zum Beispiel Pappeln) sollten nach der Ernte nicht brachfallen
- Erhalt von Grünflächen in städtischen Außenbereichen zur Kalt- und Frischluftregeneration
- Schrumpfungsprozesse in Städten (engl. „Shrinking Cities Problem“) zum Rückbau von Versiegelungsflächen nutzen und in Grünflächen umgestalten



abgeführt werden können. Am suburbanen Standort sind diese Anteile mit 54 % (So) bzw. 41 % (Wi) erstens höher und zweitens wegen der optimalen Wasserverfügbarkeit auch wesentlich schwankungsärmer als in der Stadt. Gelegentlich überschreitet der Betrag von Q_E denjenigen der Strahlungsbilanz Q^* am suburbanen Standort insbesondere in den Nachmittagsstunden (hier nicht dargestellt). In derartigen Fällen spricht man von einem „Oaseneffekt“, bei dem ein hohes Verdunstungspotential durch Q^* nicht gedeckt werden kann. Dadurch wird Energie der Umgebung zur Kompensation der Strahlungsbilanz entzogen und deshalb auch die Umgebung gekühlt.



Der Vergleich in Abb. 10 verdeutlicht, dass Grünflächen, die bei guter Bodenwasserversorgung ein hohes Evapotranspirationspotential aufweisen, zu einer signifikanten Verbesserung der thermischen Behaglichkeit beitragen können. Von stadtplanerischer Seite sollte diesem Aspekt wegen der zukünftig häufiger zu erwartenden Hitzewellen größere Beachtung als bisher geschenkt werden. Allerdings muss dann auch

Tabelle 3. Übersicht über Größe, Umgebung, maximale Kühleffekte (PCI_{max}) und thermische Reichweiten städtischer Grünflächen (nach einer Zusammenstellung in [47], gekürzt und verändert, Literatur siehe dort; hier nach [63])

Größe In ha (gerundet)	Lage (UHI in K)	Park	Gestaltung	PCI_{max} In K	Reichweite In m	Quelle
3	Kumamoto(Kyushu) [3 tags, 2 nachts]	Kengung Shinto Shrine	Bäume	2,5(15 Uhr)	50	Saito u.a. 1990
5	Vancouver (6 bei Sonnen-Untergang)	Trafalgar-Park	Greas, Baumrand teilweise bewässert	5,0(nachts) Messfahrt	200 – 300	Spronken-Smith Und Oke 1998
18	Berlin	Stadtpark Steglitz	-	1,0 (abends)	80 – 140	von Stülpnagel 1987
30	Mainz	Stadtpark	-	2,0 (morgens)	<300	Naumann 1981
44	Stuttgart	Schlossgarten	-	1,3 (Jahresmittel) 3,8 (Tagesmittel)	200	Knapp 1998
80	Kopenhagen	Falledparken	Gras + Bäume	2,1 (22 Uhr)	100	Eliasson and Upmann 2000
125	Berlin	Kleingärten Priesterweg	Garten	5,5 (abends)	250	von Stülpnagel 1987
156	Göteborg	Slottsskogen	-	3,3 (18 U hr) Station	250	Eliasson and Upmann 2000
212	Berlin	Tiergarten	Wald / Gras	4,3 (abends)	200 – 1300	von Stülpnagel 1987
525	Mexico City	Chapultepec	Mix (Bäume, Gras); Nicht be wässert	4,0(Trockenzeit) 1,0 (Regenzeit)	2000 (eine Park-breite)	Jauregui 1990

sichergestellt werden, dass für die Bewässerung in ausreichendem Maße Wasser zur Verfügung steht [46]. Verbundforschungsprojekte wie *dynaklim* (s. oben) nehmen sich dieser Fragestellung an.

Städtische Grünflächen werden wegen ihrer meist niedrigeren Temperaturen im Vergleich zur (überwiegend wärmeren) bebauten Umgebung als „Kühleinseln“ bezeichnet [47]. Die Unterschiede sind nachts stärker ausgeprägt als tagsüber.

Durch die niedrigeren Temperaturen der Grünflächen bedingt, kann es des Weiteren zu lokalen Ausgleichszirkulationen zwischen diesen und dem bebauten Gebiet kommen. Derartige Parkwinde erreichen nur geringe Geschwindigkeiten und treten eher intermittierend denn kontinuierlich auf. Die Eindringtiefe der Kaltluft in die bebauten Umgebung wird sowohl von der Gestaltung und Einfassung einer Grünfläche als auch von der Art der sie umgebenden Bebauung bestimmt. Liegt eine Grünfläche zum Beispiel in einer Mulde oder wird sie von einer hohen Mauer umgeben, so wird der Luftaustausch hierdurch behindert und die Eindringtiefe in das bebauten Areal verkürzt. Maueröffnungen mit senkrecht dazu verlaufenden Straßen können jedoch Schneisenfunktionen übernehmen und kühle Luft in die Straßenschluchten ableiten.

Auf Seiten der Bebauung bestimmen dagegen deren Höhe und Dichte die Eindringtiefe der aus den Grünflächen stammenden Luft. Geschlossene hohe Häuserfronten behindern den klimatisch günstigen Einfluss, aufgelockerte Bauweise hingegen fördert ihn. Von stadtklimatisch-planerischer Relevanz ist die

Beantwortung der Frage, wie groß eine Grünfläche sein muss, um zu einer Temperaturreduktion zu führen und bis zu welcher Entfernung von der Grünfläche in das bebauten Gebiet hinein sich ein temperatursenkender Einfluss nachweisen lässt. Grundsätzlich dürfte mit der Größe einer Grünfläche auch eine stärkere thermische Reichweite in Verbindung stehen [48], in welchem Maße das geschieht, zeigt exemplarisch Tabelle 3.

Ferner bewirkt das durch Bäume vergrößerte Bestandsvolumen in Kombination mit der Reduzierung der Windgeschwindigkeit eine effektive Filterung der durch den Stammraum strömenden Luft. So können zum Beispiel Nadelbäume ein Mehrfaches an Spurenstoffen durch nasse und trockene Deposition im Vergleich zum Freiland ausfiltern [49]. Für die Absorption von Stäuben spielen dabei Art und Dichte der Vegetation, insbesondere der Blattflächenindex (engl. Leaf Area Index, LAI), eine maßgebliche Rolle (Zusammenstellung in [20,50]).

Schon 200 m entfernt von einer stark befahrenen Straße konnten innerhalb einer Grünfläche im Jahresmittel Minderungswerte zwischen 40 % und 50 % für die atmosphärischen Spurenstoffe NO und NO₂ bzw. um 20 % niedrigere Immissionskonzentrationen für CO im Vergleich zu den Ausgangskonzentrationen am Straßenrand ermittelt werden, während die Ozonkonzentrationen in der Grünfläche allerdings um bis zu 20 % höher waren als am Straßenstandort [51].

Auch zeichnen sich Grünflächen durch eine höhere relative Luftfeuchtigkeit gegenüber versiegelten Flächen aus.

Tabelle 4. Ozonbildungspotential (OBP) und Trockentoleranz ausgewählter Baumarten und ihre Verwendungsempfehlung bei höheren Temperaturen (Quelle: kombiniert nach [56,68], verändert; hier nach [63])

Lateinischer Name	Trivialname	geringes Ozonbildungs-potenzial	hohe Trocken-toleranz
<i>Acer campestre</i>	Feldahorn	++	++
<i>Acer rubrum</i>	Rotahorn	++	++
<i>Carya ovata</i>	Schuppenrindenhickory	++	+
<i>Carya tomentosa</i>	Spottnuss	++	++
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	Grünesche, Rotesche	++	+
<i>Ginkgo biloba</i>	Ginkgo, Fächerbaum	++	++
<i>Malus tschonoskii</i>	Wollapfel	++	+
<i>Pinus ponderosa</i>	Gelbkiefer	+	++
<i>Pinus sylvestris</i>	Waldkiefer	+	++
<i>Prunus avium</i>	Vogelkirsche	++	++
<i>Pyrus communis</i>	Kulturbirne	++	+
<i>Pyrus pyraster</i>	Wildbirne	++	+
<i>Quercus rubra</i>	Roteiche	+	+
<i>Sophora japonica</i>	Japanischer Schnurbaum	+	++
<i>Ulmus parvifolia</i>	Japanische Ulme	++	+
<i>x Cupressocyparis leylandii</i>	Leylandzypresse	++	+
<i>Zelkova serrata</i>	Japanische Zelkove	++	+

1) Geringes OBP: Isoprenemission < 2µg/g TS; ++ = sehr gut, + = gut, **fett**: einheim. Arten

Maßnahmenkatalog

Grundsätzlich ist der Vegetationsanteil in den Städten zu erhöhen, um die Oberflächen- und Lufttemperaturen zu senken. Dabei sollte beachtet werden, als Straßengeleitgrün 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 Straßebäume über der Straßenmitte keinen gemeinsamen Kronenschluss aufweisen, da ein derartiger „Tunneleffekt“ die Belüftung behindern und so zu einer Anreicherung der Kfz-Emissionen führen kann.

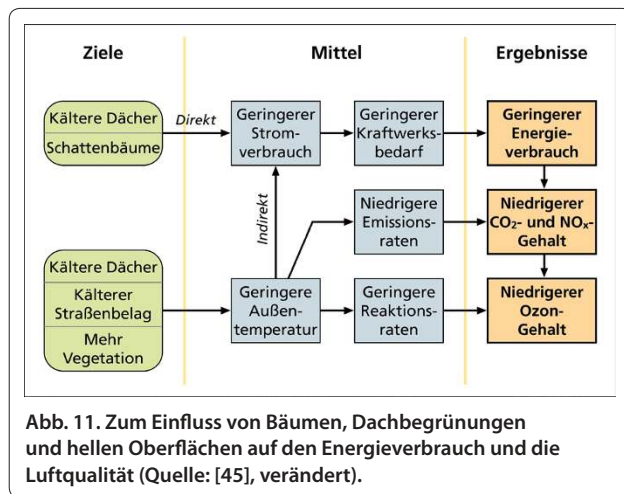
Größere ebenerdige Grünflächen in Städten sollten nach dem sogenannten „Savannenprinzip“ [52] gestaltet werden: Danach wachsen auf Rasenflächen nur vereinzelt großkronige Bäume, die tagsüber zwar für eine ausreichende Beschattung sorgen, nachts hingegen bei negativer Strahlungsbilanz eine optimale Abkühlung des Bodens zulassen.

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. Dabei ist zu berücksichtigen, dass während hoher Temperaturen verschiedene Pflanzenarten in starkem Maße biogene Kohlenwasserstoffe (engl. Volatile Organic Compounds, VOCs), welche die Ozonbildung begünstigen, freisetzen können, wozu insbesondere das hochreaktive Isopren, aber auch Terpene und Limonen zählen [53,54] (siehe auch Teil 1 dieses Beitrages [1]). Aus diesem Grund sollten möglichst Pflanzen Verwendung finden, die zu den sogenannten „Low-Emitter-Pflanzen“ zählen [55,56]. Dabei handelt es sich um Pflanzen, deren Isoprenemission unter Hitzestress nicht mehr als 2 µg pro g Trockensubstanz pro Stunde beträgt. Tabelle 4 enthält ausgewählte Bäume, die sowohl durch ein geringes Ozonbildungspotential charakterisiert werden als auch optimale Toleranzen gegenüber Trockenheit bei eingeschränkter Wasserversorgung aufweisen.

Städte weisen einen nicht unerheblichen Bedarf an Parkplatzflächen auf. So beläuft sich ihr Anteil an den Stadtflächen der USA auf etwa 10 % und in Japan auf rund 7 % [57]. Da die meisten dieser Flächen asphaltiert sind und wegen der dunklen Farbe besonders stark Wärme absorbieren, dürfte Beschattung oder Begrünung des Untergrundes die Energiebilanz in erheblichem Maße positiv beeinflussen. So weist eine grasbewachsene Parkplatzfläche im Vergleich zu einer asphaltierten Fläche bei sommerlichen Einstrahlungshöchstwerten maximale Temperaturunterschiede der Oberfläche von bis zu 15 K

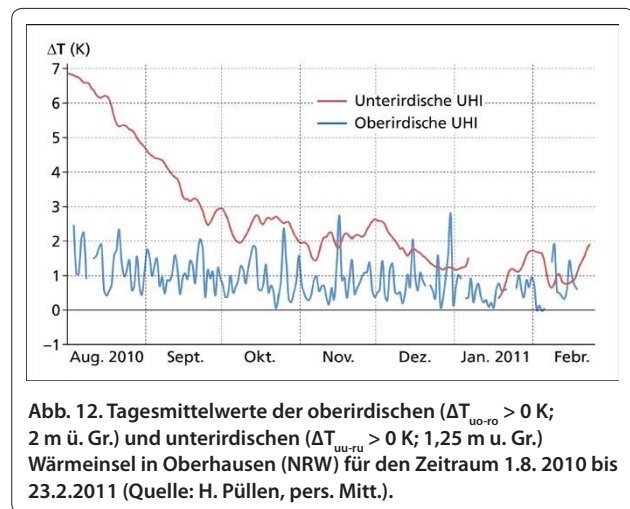


auf. Tagsüber kann der sensible Wärmestrom dadurch um 100 bis 150 W/m², nachts um etwa 50 W/m² verringert werden [58]. Hieran zeigt sich, dass vegetationsbedeckte Parkplatzflächen auch nachts die städtische Wärmeinselintensität zumindest lokal in ihrer Ausbreitung und Intensität einschränken bzw. verringern können. Allerdings gilt das nur für intakte und bewässerte Rasenuntergründe. Ist nämlich die Grasnarbe beschädigt, fallen die Abkühlungseffekte wesentlich niedriger aus [59].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Beschattung, Begrünung oder auch die Aufhellung von Oberflächen bei hoher sommerlicher Einstrahlung direkte bzw. indirekte Auswirkungen auf Gebäude oder Stadtquartiere haben können, die nicht nur zu niedrigeren Temperaturen, sondern auch zu geringerem Energieverbrauch durch Drosselung von Klimaanlage führen (Abb. 11). Letzteres hat zur Folge, dass weniger Kraftwerksleistung benötigt wird, wodurch in geringerem Maße Luftverunreinigungen bzw. klimaschädigende Spurenstoffe freigesetzt werden. Darüber hinaus senken niedrigere Temperaturen chemische Reaktionsraten, wodurch die Bildung insbesondere sekundärer atmosphärischer Spurenstoffe vermindert werden kann.

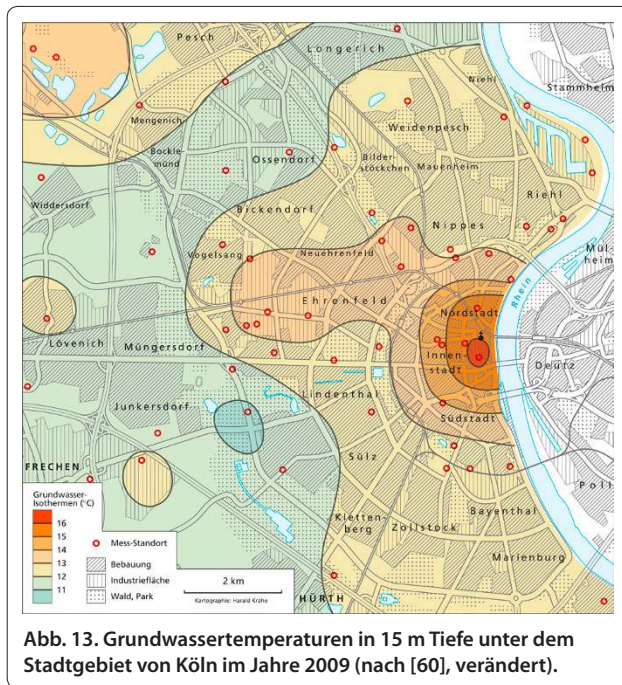
Energetische Nutzung des städtischen Untergrunds

Um Energie zu Kühl- oder Heizzwecken einzusparen und damit einen Beitrag zur Verringerung urbaner CO₂-Emissionen zu leisten, bietet sich in Stadtgebieten die Nutzung der als städtische Wärmeinsel (UHI) bekannten Überwärmung urbaner Gebiete (u) im Vergleich zum Umland (r) ($\Delta T_{u-r} > 0$ K) an. Diese Überwärmungen, die auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden können (siehe Teil 1 [1]), lassen sich nicht nur an der Bodenoberfläche und in der städtischen Atmosphäre – also oberirdisch ($\Delta T_{uo-ro} > 0$ K) – nachweisen, sondern treten



auch im oberflächennahen und –fernen Untergrund auf ($\Delta T_{uu-ru} > 0$ K). Beispiele dazu zeigt Abb. 12 anhand von Untersuchungen in der Stadt Oberhausen (NRW). Hier ist die atmosphärische Grenzschichtwärmeinsel dadurch charakterisiert, dass sich relativ unabhängig von der Jahreszeit Überwärmungen von bis zu 3 K mit unterschiedlich großen interdiurnalen Spannweiten einstellen, die wetterlagenabhängig gesteuert sind. Ruhiges Strahlungswetter vergrößert zum Beispiel die Differenzen zwischen Stadt und Umland, windige, regenreiche Witterung lässt die Unterschiede hingegen weitgehend verschwinden. In Bezug auf den Verlauf der oberirdischen UHI ist die unterirdische (oberflächennahe) Wärmeinsel wesentlich stärker durch die Jahreszeiten geprägt. So werden in den Sommermonaten mit $\Delta T_{uu-ru} \leq 7$ K relativ hohe, in den Wintermonaten hingegen niedrigere Werte erreicht ($\Delta T_{uu-ru} < 2$ K). Die vorliegenden Differenzen des Bodenwärmehalts zwischen dem städtischen und dem ruralen Standort dürften sich über den Einsatz von Wärmepumpen zu Kühl- und Heizzwecken nutzen lassen. Setzt man voraus, dass die unterirdische städtische Wärmeinsel einen mittleren jährlichen Temperaturüberschuss von 3 K zur Vergleichstiefe im Umland aufweist und die hiervon betroffene Innenstadtfäche 1 km² beträgt, dann würde bei einer Wärmekapazitätsdichte des Bodens von $\zeta = 2 \cdot 10^6$ J/(m³·K) und vollständiger Ausnutzung der genannten Temperaturdifferenz etwa 17,5 · 10⁵ kWh/(km²·a) im Vergleich zum kühleren Umland an Energie eingespart werden können. Das entspräche in etwa dem Jahresenergieverbrauch von mehr als 400 deutschen Normfamilien (Verbrauch: 4.000 kWh/a) und unter Zugrundelegung einer Emission von 0,6 kg CO₂ eq/kWh (deutscher Kraftwerksmix) einer Vermeidung von etwa 1.000 t CO₂/km².

Auch der Energiegehalt von Grundwasser unter Stadtgebieten ist wegen des Wärmeiselleffekts vergleichsweise



größer als unter nicht bebauten Oberflächen. Wie Temperaturmessungen in Brunnen am Beispiel der Stadt Köln zeigen (Abb. 13), ergeben sich unter dem Stadtkern in 15 m Tiefe Wassertemperaturen von 16 °C, während unter weniger dicht bebauten Stadtteilen allenfalls 11 °C erreicht werden [60]. Unter Zugrundelegung einer Differenz von etwa 5 K lässt sich für eine etwa 10 m mächtige Schicht ein Wärmeinhalt von mindestens $4,8 \cdot 10^{10}$ kJ/km² berechnen. Wird vorausgesetzt, dass der Gebäudeenergiebedarf in Köln etwa $1,9 \cdot 10^{10}$ kJ/(km²·a) beträgt, dann kann durch die unterirdische städtische Wärmeinsel wenigstens der 2,5-fache Energiebedarf für Heiz- oder Kühlzwecke von Gebäuden in Köln bereitgestellt werden. Für diese Abschätzung wurde von einer Gebäudeenergieversorgung von etwa 50 kWh/(m²·a) ausgegangen [60]. Neben der Energieeinsparung würde es unter Berücksichtigung der bereits oben genannten Emission von 0,6 kg CO₂ eq/kWh (deutscher Kraftwerksmix) zu einer Emissionsverringerung von etwa 3.000 t CO₂/km² kommen können.

Ausblick

Um Minderungsmaßnahmen gegen den Klimawandel in Städten durch Oberflächenentsiegelungen, Begrünungen, Erhalt oder Ausweisung von Ventilationsbahnen sowie Vernetzungskorridore zu realisieren, wird Platz benötigt, der vielfach nicht zur Verfügung steht. Da im Bereich der bestehenden Bebauung deutscher Städte Erneuerungsraten der Bausubstanz von höchstens 2 %/a als realistisch anzusehen sind, dürfte eine kurzfristige Umsetzung deshalb eher unwahrscheinlich sein.

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 von Städten ermöglicht es [61], offen gelassene Wohnquartiere zum Beispiel sinnvoll zu begrünen und dadurch einer möglichen Überwärmung vorzubeugen.

Eine dem Klimawandel gerecht werdende Stadtplanung sollte eine kompakte, dennoch perforierte 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 Privatkraftfahrzeugen 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. Ferner sollte das vielerorts seit einiger Zeit zu beobachtende suburbane Wachstum (engl. „urban sprawl“) zugunsten des Erhalts stadtrandnaher Kaltluftbildungsflächen aufgegeben werden.

Received: 03 May 2011 Accepted: 10 June 2011
Published: 10 June 2011

Literatur

1. Kuttler W (2011): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen; Climate change in urban areas, Part 1, Effects. *Environmental Sciences Europe* (ESEU), Springer open, DOI: 10.1186/2190-4715-23-11, S. 1-12.
2. Velasco E, Roth M (2010): Cities as net sources of CO₂; Review of atmospheric CO₂ exchange in urban environments measured by eddy covariance technique. *Geography Compass* 4,9, 1238-1259
3. Grimmond CSB, Salmond JA, Oke TR, Offerle B, Lemonsu BA (2004): Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum. *Journal of Geophysical Research* 109, D24101
4. Vogt R, Christen A, Rotach MW, Roth M, Satyanarayana ANV (2006): Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a Central European city. *Theor. Appl. Climatol.* 84, 117-126
5. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
6. Baede APM, van der Linden V, Verbruggen A (2008): Glossar. In: Kernautorenteam Synthesebericht IPCC. Pachauri RK, Reisinger A (Hrsg.): Klimaänderung 2007. Synthesebericht. – Berlin (Übersetzung von der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle; Original: Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO / UNEP (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report), 86-99
7. Holst J, Mayer H (2010): „Verbundkoordination (KLIMES ALUF-1)“ und „Planungsrelevante human-biometeorologische Bewertung von städtischen Strukturen bei thermischen Stressbedingungen hinsichtlich der Anpassung an Extremwetter (KLIMES ALUF-2)“. Schlussbericht zum Teilvorhaben. Meteorologisches Institut, Freiburg
8. Hidalgo J, Pigeon G, Masson V (2008): Urban breeze circulation during the CAPITOUL experiment: observational data analysis approach. *Meteorol. Atmos. Phys.* 102, 223-241
9. Barlag A- B, Kuttler W (1990/91): The Significance of Country Breezes for

- Urban Planning. *Energy and Buildings* 15, 3-4, 291-297
10. ExWoSt, Experimenteller Wohnungs- und Städtebau [<http://www.exwost.de> bzw. http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ExWoSt/exwost__node.html]
 11. Dynamische Anpassung an den Klimawandel der Emscher-Lippe-Region [<http://www.dynaklim.de>]
 12. Der Essener Heizspiegel 2009, Stadt Essen [http://www.essen.de/deutsch/rathaus/aemter/ordner_59/energie/Downloads/Essener_Heizspiegel_web1.pdf]
 13. Hegger M (2009): *Sonnige Aussichten*. Verlag Müller und Busmann
 14. Kolokotroni M, Giannitsaris I, Watkins R (2006): The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. *Solar Energy* 80, 383-392
 15. DIN EN 15251, Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251, August 2007
 16. Energieagentur NRW 2008 (decker@energieagentur.nrw.de)
 17. MURL (Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW (Hrsg.) (1989): *Klimaatlas Nordrhein-Westfalen*. Düsseldorf
 18. Gertis K (1977): Bauphysikalische Aspekte des Stadtklimas. In: Franke E (Hrsg.): *Stadtklima. Ergebnisse und Aspekte für die Stadtplanung*, 87-96
 19. Alexandri E, Jones P (2008): Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 43, 480-493
 20. Litschke T, Kuttler W (2008): On the reduction of urban particle concentration by vegetation - a review. *Meteorologische Zeitschrift*, 17, 3, 229-240
 21. Harazono Y, Teraoka S, Nakase I, Ikeda H (1990/91): Effects of Rooftop Vegetation using Artificial Substrates on the Urban Climate and the Thermal Load of Buildings. *Energy and Buildings* 15-16, 435-442
 22. Höschle K, Schmidt H (1974): Klimatische Wirkungen einer Dachbegrünung. *Garten und Landschaft* 6, 334-337
 23. Holmer B, Thorrson S, Eliasson I (2007): Cooling rates, sky view factors and the development of intra-urban air temperature differences. *Geogr. Ann.* 89, 4, 237-248
 24. Erell E, Pearlmutter D, Williamson T (2011): *Urban Microclimate – Designing the Spaces between Buildings*. Earthscan Publications Ltd., London, Washington, 1st ed
 25. Bottony Z, Unger J (2003): A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. *Theor. Appl. Climatol.* 75, 233-243
 26. Blankenstein S, Kuttler W (2004): Impact of street geometry on downward longwave radiation and air temperature in an urban environment. *Meteorologische Zeitschrift* 13, 5, 373-379
 27. Synnefa A, Santamouris M, Livada I (2006): A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy* 80, 968-981
 28. Mayer H (2006): Indizes zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen und lufthygienischen Komponente des Klimas. *Gefahrstoff-Reinhalte der Luft* 66, 165-174
 29. Jendritzky G (2008): The assessment of the thermal environment. *Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg* 17, 153-164
 30. Jendritzky G, Bröde P, Fiala D, Havenith G, Weihs P, Batchvarova E, de Dear R (2009): *Der thermische Klimaindex UTCI. Klimastatusbericht 2009*, Deutscher Wetterdienst, 96-100
 31. Matzarakis A (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas. *Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg* Nr. 6
 32. McPherson EG, Simpson JR (1995): Shade trees as a demand – side resource. *Home energy* 2, 11-17
 33. Shashua-Bar L, Hoffman ME (2000): Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. *Energy and Buildings* 31, 221-235
 34. Donovan G, Butry D (2009): The value of shade: Estimating the effect of trees on summertime electricity use. *Energy and Buildings* 41, 662-668
 35. Mayer H, Kuppe S, Holst J, Imbery F, Matzarakis A (2009): Human thermal comfort below the canopy of street trees on a typical Central European summer day. *Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg* Nr. 18, 211-219
 36. Ali-Toudert F, Mayer H (2007): Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy* 81, 742-754
 37. Baldinelli G (2009): Double skin facades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment* 44, 1107-1118
 38. He J, Hoyano A (2010): Measurement and evaluation of the summer microclimate in the semi-enclosed space under a membrane structure, *Building and Environment* 45, 1, 230-242
 39. Gill SE, Handley JF, Ennos AR, Pauleit S (2007): Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment* 33, 1, 113-133
 40. Shashua-Bar L, Pearlmutter D, Erell E (2009): The cooling efficiencies of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning* 92, 179-186
 41. Horbert M (2000): *Klimatologische Aspekte der Stadt- und Landschaftsplanung*. Schriftenr. Fb Umwelt und Gesellschaft, TU Berlin 113
 42. Lin B, Li X, Zhu Y, Qin Y (2008): Numerical simulation studies of the different vegetation patterns' effects on outdoor pedestrian thermal comfort. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1707-1718
 43. Robitu M, Musy M, Inard C, Groleau D (2006): Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy* 80, 435-447
 44. Heisler GM (1986): Energy savings with trees. *Journal of Arboriculture* 12, 113-124
 45. Akbari H, Pomerantz M, Taha H (2001): Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 70, 3, 295-310
 46. Cleugh H A, Bui E N, Simon D A P, Mitchell V G, Xu J (2005): The impact of suburban design on water use and microclimate. In: Zenger A, Argent R M (Hrsg.): *MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2005, S. 2019-2025*
 47. Bongardt B (2006): *Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen - dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks*. *Essener Ökol. Schr.*, Band 24, Westarp-Wissenschaften, Hohenwarsleben, 227 S.
 48. Hamada S, Ohta T (2010): Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening* 9, 1, 15-24
 49. Wrzesinsky T (2004): *Direkte Messung und Bewertung des nebelgebundenen Eintrags von Wasser und Spurenstoffen in ein montanes Waldökosystem*. Dissertation Universität Bayreuth, Biologie, Chemie und Geowissenschaften, 108 S.
 50. Jonas R, Horbert M, Pflug W (1985): Die Filterwirkung von Wäldern gegenüber staubbelasteter Luft. *Forstwiss. Centralblatt* 104, 5, 289-299
 51. Ropertz A (2008): *Transport atmosphärischer Spurenstoffe in eine innerstädtische Grünfläche - Eine Analyse mittels optischer Fernmessverfahren*. *Essener Ökol. Schr.*, Band 26, Westarp-Wissenschaften, Hohenwarsleben, 235 S.
 52. Spronken-Smith RA (1994): *Energetics and Cooling in Urban Parks*. PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver
 53. Pacifico F, Harrison SP, Jones CD, Sitch S (2009): Isoprene emissions and climate. *Atmospheric Environment* 43, 6121-6136
 54. Sharkey T, Wiberley A, Donohue A (2008): Isoprene Emission from Plants: Why and How. *Annals of Botany* 101, 5-18
 55. Taha H (1996): Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, 30, 20, 3423-3430
 56. Benjamin MT, Winer AM (1998): Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. *Atmospheric Environment* 32, 53-68
 57. Onishi A, Cao X, Ito T, Shi F, Imura H (2010): Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. *Urban Forestry and Urban Greening* 9, 323-332
 58. Takebayashi H, Moriyama M (2009): Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking. *Solar Energy* 83, 211-223
 59. Kanemoto S, Matsushita Y, Moriyama M, Takebayashi H (2009): An observation study on the degradation of the heat island mitigation effect by damage to the grass in "Grass Parking". *Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*, Nr. 18, März 2009 - 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, Okt. 2008, 95-100
 60. Zhu K, Blum P, Ferguson G, Balke K-D, Bayer P (2010): The geothermal potential of urban heat islands. *Environmental Research Letters* 5, 4, 044002
 61. Oswalt P, Rieniets T (2006): *Atlas of Shrinking Cities*. Hatja Cantz Verlag, Ostfildern
 62. Hornschuch AG, Broschüre *Cool Colors* [http://www.hornschuch.de/ximages/429725_CoolColors_dt.pdf]
 63. Kuttler W (2010): *Das Ruhrgebiet im Klimawandel - Bestandsaufnahme und Prognose*. *Essener Unikate - Berichte aus Forschung und Lehre* 38, Beiträge zur "Ruhr 2010", 40-51

64. Dousset B, Gourmelon F, Laaidi K, Zeghnoun A, Giraudet E, Bretin P, Vandentorren S (2009): Satellite monitoring of summertime heat waves in the Paris Metropolitan Area. 7th Int. Conf. Urban Clim., 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan
65. Hupfer P, Kuttler W (2006): Witterung und Klima, 12. Auflage, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 554 S
66. Polster G (1969): Erfahrungen mit Strahlungs-, Temperaturgradient- und Windmessungen als Bestimmungsgrößen der Diffusionskategorien. *Meteorologische Rundschau* 22, 170-175
67. Düttemeyer D (2000): Urban-Orographische Bodenwindssysteme in der städtischen Peripherie Kölns. *Essener Ökologische Schriften* 12, Hohenwarsleben: Westarp-Wissenschaften
68. Roloff A, Bonn S, Gillner S (2008): Baumartenwahl und Gehölzverwendung im urbanen Raum unter Aspekten des Klimawandels. *Forstwiss. Beitr. Tharandt / Contr. For. Sc. Beiheft* 7, 92-107

doi:10.1186/2190-4715-23-21

Cite this article as: Kuttler W: Climate change in urban areas. Part 2, Measures. *Environmental Sciences Europe* 2011, **23**:21.