

# Geographische Rundschau

5 1985

## Umwelt aktuell

**Die Stadt als  
Ökosystem.**

**Stadtklima.**

**Ökologische Planung  
und Stadterneuerung.**

**Taschenpolder als  
Hochwasserschutz-  
maßnahme  
am Oberrhein.**

**Das Waldsterben aus  
immissionsökologischer  
Sicht.**

**Aktuelle  
landschafts-  
ökologische  
Probleme im  
Rheinischen  
Braunkohlen-  
revier.**

*westermann*



Etwa in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts setzte zunächst vor allem in Mitteleuropa und Nordamerika der Prozeß der Verstädterung ein, der bis heute große soziale, wirtschaftliche, finanzielle und planerische Probleme aufgeworfen hat. Darüber hinaus sind in den Agglomerationsgebieten eklatante Einbußen an Umweltqualität aufgetreten. Die Veränderungen, die sich insbesondere für das örtliche Klima und Bioklima ergeben haben, werden im nachfolgenden Beitrag exemplarisch analysiert. Außerdem wird der Frage nachgegangen, wie die überwiegend als negativ empfundenen stadtklimatischen Einflüsse durch planerische Maßnahmen verbessert werden können.



W. Kuttler

Wilhelm Kuttler

# Stadtklima

## Struktur und Möglichkeiten zu seiner Verbesserung

### Veränderungen des städtischen Strahlungs- und Energiehaushaltes

Städtische und industrielle Agglomerationsräume besitzen eine besonders bei Strahlungswetterlagen gut sichtbare Dunsthaube, die das Weichbild der bebauten Fläche nachzeichnet. (Abb. 1, Stadtansicht von Tokyo). Die Anreicherung der verschiedenen Spurenstoffe mit ihren unterschiedlichen Absorptions-, Transmissions- und Reflexionseigenschaften gegenüber der einfallenden Sonnenstrahlung führt zu qualitativer Veränderung des Sonnenspektrums und zu quantitativer Einbuße der Strahlungintensität. Die Abnahme der Beleuchtungsstärke läßt sich anhand eines Vergleichs der Sonnenscheindauer zwischen Stadt und Umland gut erkennen (Abb. 3). So sind vornehmlich in den Sommermonaten relativ hohe Einbußen in der Stadt zu verzeichnen – im Juni sogar 24 Stunden (= 1,6%) – im Winter bei absolut

geringerer Beleuchtungsstärke dagegen nur 3–6 Stunden (= 0,4%).

Aus den niedrigen Stadtwerten darf jedoch nicht geschlossen werden, daß dort die Sonne weniger scheint als auf dem Lande. Es handelt sich hierbei vielmehr um einen Intensitätsverlust der Strahlung, der durch stärkere städtische Dunstanreicherung hervorgerufen wird. Allgemein kann davon ausgegangen werden, daß je nach Lage, Größe und Aufbau sowie vorherrschendem Emissionstyp die Sonnenscheindauer eines Stadtgebietes zwischen 10% und 20% im Vergleich zum Umland reduziert ist (Eriksen 1979, Landsberg 1981).

Verbunden mit einer Verminderung der Beleuchtungsstärke läßt sich in Städten auch eine von der Wellenlänge abhängige Absorption der Sonnenstrahlung feststellen (Tab. 1). So werden durch die Dunstanreicherungen besonders die kurzen und sehr kurzen Wellenlängen relativ stark vermindert: im violetten Spektralbereich um den Faktor 2, im UV-Bereich

um bis zu 90% (Bach 1970). Im Winter kann es sogar vorkommen, daß fast keine der für die Bildung des Antirachitisvitamins D3 notwendigen UV-Strahlung bis in die Städte vordringt.

Input und output städtischer Strahlungs- und Energieflüsse werden sowohl durch die Stadtatmosphäre selbst als auch durch die Art der bebauten Fläche (Reflexionsgrad, Wärmeleitung und Wärmekapazität der Materialien) sowie durch deren Oberflächenvergrößerung in erheblichem Maße verändert. Die Unterschiede im Strahlungs- und Energiehaushalt zwischen Stadt und Umland zeigt Abb. 4 für eine Tagsituation – wolkenloser Himmel, maximale sommerliche mittägliche Einstrahlung vorausgesetzt – und eine Nachtsituation – ebenfalls wolkenlos – mit einem Ausstrahlungsmaximum in den frühen Morgenstunden.

Am Tage weist die Globalstrahlung (I plus H) in der Stadt einen etwa 10% niedrigeren Wert auf als im Umland; dies wird verursacht durch die vorhandene

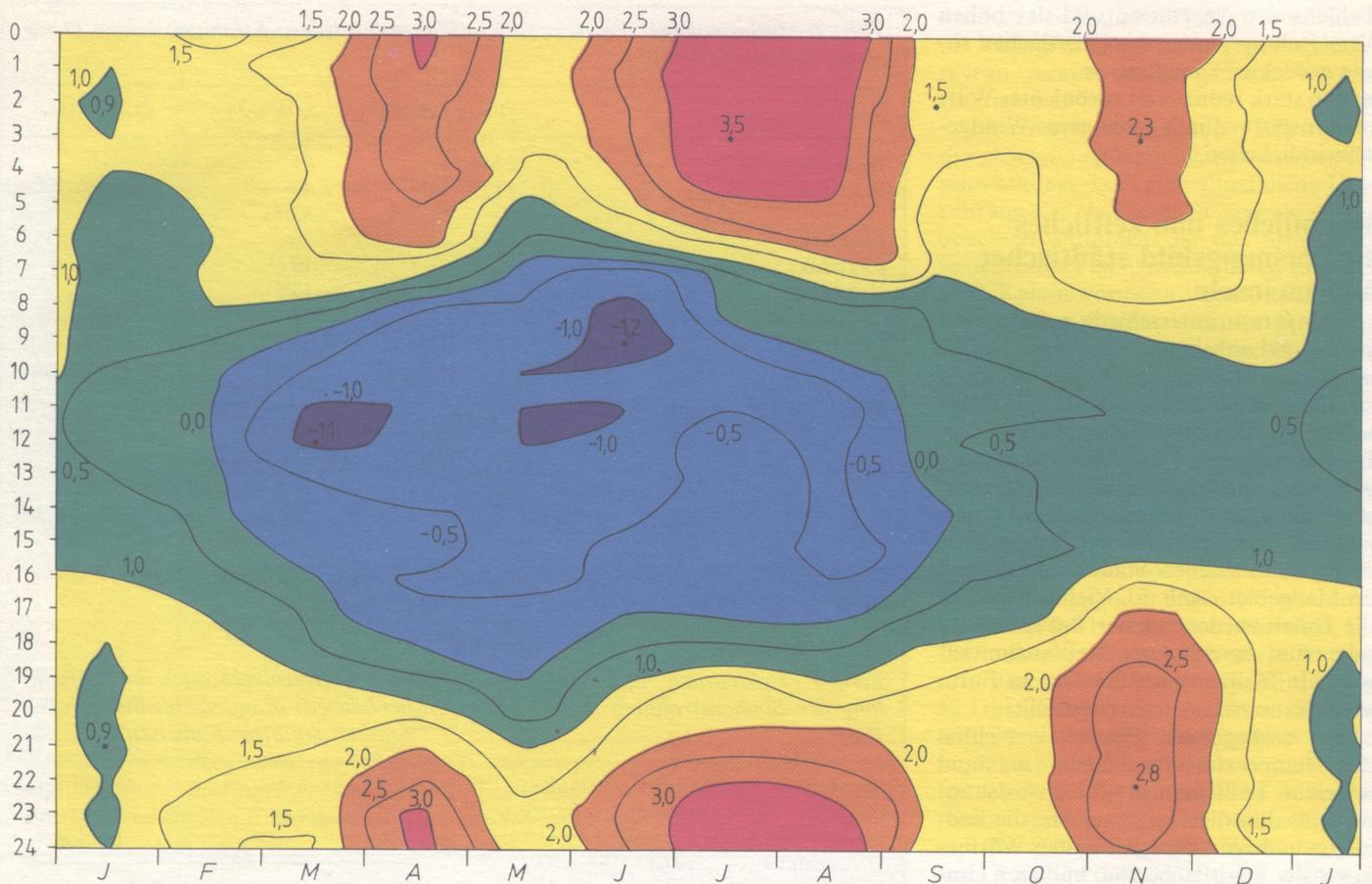


Abb. 1 (S. 226): Stadtansicht von Tokyo mit deutlich erkennbarer Dunsthaube

Abb. 2: Stündliche Differenzen der Lufttemperaturen zwischen einer Stadt- und einer Freilandstation ( $\Delta t_{\text{Stadt-Freil.}}$ ) im Jahresverlauf

Quelle: Kuttler 1984b

Dunstglocke, die einerseits zu einer Reduzierung der direkten Strahlung I, andererseits zu einer leichten Erhöhung der indirekten Strahlung H führt. Die Strahlungszunahme im indirekten Bereich kompensiert jedoch nicht die geringere direkte Einstrahlung. Für die Gegenstrahlung L wird aufgrund des Aerosolgehaltes der Stadtatmosphäre ein etwa 10% höherer Wert gegenüber dem Umland angenommen (Landsberg 1981). Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung urbaner Oberflächen schwankt natürlich der Wert für die städtische Albedo erheblich; als Orientierungswerte werden 10% bis 22% der Globalstrahlung genannt (Eriksen 1975, Raschke 1979). In dem vorliegenden Schema wurde ein Wert von 10% für die Stadt und ein solcher von 20% für das Umland gewählt. Die langwellige Ausstrahlung L der erwärmten städtischen Flächen ist etwa um 25% größer als diejenige des Umlandes; dies ist auf die Horizonteinengung und die höheren Oberflächentemperaturen im Stadtgebiet zurückzuführen. Mit dem Term A wird die „anthropogene Wärmeproduktion“ zusammengefaßt, so z. B. der Energiefluß durch schlecht isolierte Hauswände, Industrieanlagen und Kfz-Motoren, die Wärmeabgabe durch Hausbrand-, Industrie- und Autoabgase sowie die meist vernachlässigte Wärme-

emission menschlicher und tierischer Körper. Diese im allgemeinen nur schwer zu ermittelnden Zahlenangaben sind für einige Städte bereits berechnet worden (Tab. 2). Es zeigt sich, daß man bei energetischen Betrachtungen die anthropogene urbane Wärmeproduktion nicht mehr vernachlässigen sollte. Immerhin ist ihr Anteil in einigen Städten schon beachtenswert hoch: so werden z. B. in West-Berlin 37% der Strahlungsbilanz erreicht, im subpolaren Fairbanks ist ihr Wert sogar schon größer als die Strahlungsbilanz.

Mit dem Term B in Abb. 4 wird der Wärmefluß bezeichnet, der in den Boden eindringt: der Stadtwert ist etwa 2–3mal größer als der Umlandwert; dies liegt an den tagsüber auftretenden höheren Oberflächentemperaturen und der die Wärmeleitfähigkeit steigernden Bodenverdichtung in den bebauten Gebieten. Der hohe Versiegelungsgrad der Oberflächen führt darüber hinaus zu einem raschen Abfluß der Niederschläge, wodurch wesentlich weniger Energie für deren Verdunstung ET verbraucht wird als im Umland. Für das Umland wurden für ET 20% der Globalstrahlungsenergie genannt; in der Stadt schwankt diese Größe in Abhängigkeit von der Oberflächenbedeckung so stark, daß ein aussagekräftiger Mittelwert nicht berechnet werden konnte.

In der Nacht treten als Strahlungsterme die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung L, die Ausstrahlung L und die anthropogene Wärmeproduktion A auf. Diese Faktoren sind im Umland relativ gering, im Fall der anthropogenen Wärmeproduktion A können sie fast gänzlich vernachlässigt werden. In der Stadt erreichen dagegen diese drei Parameter ebenso wie der Bodenwärmestrom wesentlich höhere Werte, die auf die bereits für die Tagsituation genannten Ursachen zurückzuführen sind.

Für das Zustandekommen der positiven Temperaturanomalien in Städten lassen sich somit zusammenfassend folgende Gründe nennen (Oke 1982):

- Eine stärkere Absorption kurzwelliger Strahlung durch größere (Gebäude-) Oberflächen und Mehrfachreflexion in den Straßenschluchten.
- Eine stärkere langwellige Strahlung durch eine durch die Dunstglocke vergrößerte Absorption und Gegenstrahlung.
- Geringere langwellige Ausstrahlungsverluste durch Horizonteinengung.
- Anthropogene Wärmeemissionen vor allem von Gebäuden und vom Straßenverkehr.
- Eine höhere Wärmekapazität der bebauten Strukturen.
- Eine stark eingeschränkte Evapotranspiration wegen des überwiegenden

Fehlens von Vegetation und des hohen Versiegelungsgrades der Oberflächen sowie gedeckter Kanalisation.

- Ein stark reduzierter turbulenter Wärmetransport durch geringere Windgeschwindigkeiten.

### Räumliches und zeitliches Erscheinungsbild städtischer Wärmeinseln

Temperaturunterschiede zwischen bebauter und unbebauter Fläche lassen sich am besten durch Meßfahrten während strahlungsreicher windschwacher Wetterlagen im Stadtgebiet und in dessen Umland erfassen. Die während einer solchen Meßfahrt gewonnenen Daten repräsentieren nach ihrer graphischen Umsetzung ein Momentanbild des Temperaturverhaltens zwischen Stadt und Umland im Meßgebiet (Abb. 5). Vielfach werden die Daten zu denen einer Bezugsstation oder zum berechneten Meßfahrtmittelwert als Temperaturdifferenzen in Form einer Isanomalienkarte dargestellt.

Im vorliegenden Beispiel erreichten die Temperaturunterschiede maximal 6 Kelvin. Faßt man die 0 Kelvin-Isanomale als diejenige Linie auf, die die siedlungs- und baukörperbedingten Wärmeinseln der Stadtfläche vom kühleren Umland trennt, dann wird hiermit die bebauter von der unbebauten Fläche abgegrenzt. Veränderungen der Gestalt der Wärmeinseln können durch Kühlluftströme verursacht werden. Im hier vorgestellten Fall fließt von Norden dem Geländegefälle folgend kühle Luft dem Stadtzentrum zu und sorgt dadurch für die Einbuchtung der Wärmeinsel.

Auch innerhalb der Wärmeinsel zeigen sich Temperaturunterschiede von bis zu 3 Kelvin. Dort, wo dichte Bebauung vorherrscht, finden sich im allgemeinen die höchsten positiven Temperaturabweichungen. Innerstädtische Grünflächen und aufgelockerte Bebauung mindern dagegen die Überwärmungen. Im nicht bebauten Umland ergeben sich große negative Abweichungen vor allem dort, wo Geländemulden eine Kaltluftansammlung begünstigen.

Das Gesamtbild städtischer Wärmeinseln ist vornehmlich vom Bewölkungsgrad, von der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung abhängig (Nübler 1979). Jahres- und Tageszeit beeinflussen darüber hinaus die Konfiguration einer Wärmeinsel, wie Abb. 2 zeigt. So ist z. B. in der Zeit von Februar bis September die Stadtstation tagsüber zwischen 7 und 18 Uhr um bis zu 1 Kelvin kühler als die Umlandstation. Dieses läßt sich damit erklären, daß die zur Mittagszeit erhöhte Einstrahlung für starken konvektiven Austausch sorgt, wodurch Warmluft von den überhitzten Straßenflächen nach oben abgeführt wird; ferner kann hierfür

Tab. 2: Anthropogene Wärmeproduktion A und mittlere Strahlungsbilanz Q für einige Städte (in W/m<sup>2</sup>)

Stadt	Fläche (km <sup>2</sup> )	A (W/m <sup>2</sup> )	Q (W/m <sup>2</sup> )
Berlin, W.	234*	21	57
Budapest	113*	Jahr 43 So/Wi 32/51	—
Cincinnati	200*	26	—
Fairbanks	37*	19	18
Hamburg	747	13*	55
Los Angeles	3500*	21	108
Montreal	78*	Jahr 99 So/Wi 57/153	—
Moskau	878	127	42
New York (Manhattan)	59	So/Wi 40/198	93
Sheffield	48	Wi 19	56
Vancouver	112*	Jahr 19 So/Wi 15/23	—

\* = nur bebaute Fläche

Quelle: Nach SMIC-Report, 1971, S. 58 sowie Oke 1974, S. 35/36 aus Blüthgen/Weischet 1980

Tab. 1: Prozentuale Spektralverteilung der Sonnenstrahlung in und um Paris

Spektralbereich	Stadtzentrum	Außenbezirk
UV-Strahlung	0,3	3,0
Violett	2,5	5,0
Sichtbar	43	40
Infrarot	54	52

Quelle: Maurain 1947 aus Landsberg 1981

Tab. 4: Heizölverbrauch von Einfamilienhäusern in unterschiedlich großen Städten (relative Einheiten)

	Relativer Ölverbrauch
Engstehende städtische Reihenhäuser	1,0
offene Häuserreihen	1,3
freistehende Zweifamilienhäuser	
in offenen Häuserreihen	1,5
freistehende Zweifamilienhäuser	
mit weiteren Häusern in der näheren Umgebung	1,7
ohne weitere Häuser in der näheren Umgebung	2,1

Quelle: Landsberg 1981

Tab. 3: Absolute und prozentuale Anzahl der Stunden mit verschiedenen Empfindungen der Menschen in der Innenstadt und am Stadtrand<sup>1</sup>

	schwül	leicht schwül	behaglich	leicht kühl	kühl
Stadt	186	287	1483	697	3552
Stadtrand	128	242	1389	653	3793
Stadt - Stadtrand	58	45	94	44	-241
Prozentanteil					
Stadt	45%	19%	7%	7%	6%

<sup>1</sup> Pro Tag wurde ausschließlich der Zeitraum 6:00 bis 22:00 MEZ zugrundegelegt. Meßzeitraum Jan. - Dez. 1982. Einteilung erfolgte nach Flach (1957) in Baumgartner et al. (1984). Als Behaglichkeitskenngröße wurde die Äquivalenttemperatur (T<sub>eq</sub>) verwendet.  $T_{eq} = T_a + m \cdot (r - 2,326 \cdot T_a) / (C_p + m \cdot C_w)$   
T<sub>a</sub> = Lufttemperatur, m = Mischungsverhältnis des Wasserdampfes, r = Verdunstungswärme von Wasser, C<sub>p</sub> = spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck, C<sub>w</sub> = spezifische Wärme von Wasser  
Quelle: Baumgartner et al. 1984

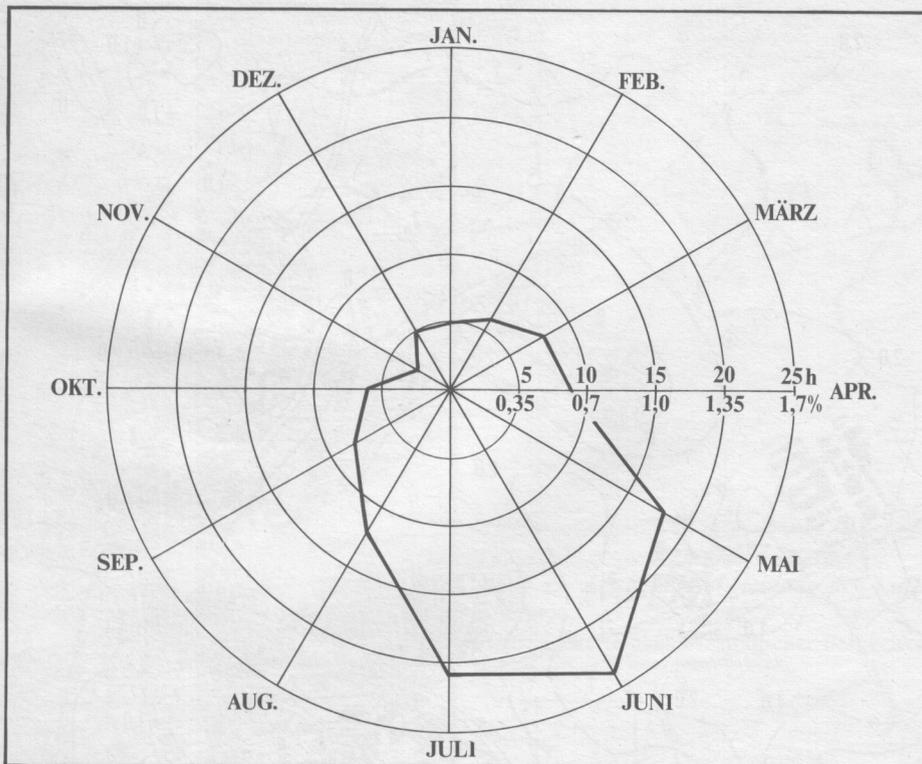


Abb. 3: Differenz der monatlichen Sonnenscheindauer ( $\Delta S_{BO-E}$ ) zwischen einer Stadt- (Bochum) und einer Freilandstation (Essen-Mülheim) (Periode: 1951–1970)  
Quelle: Luftreinhalteplan Ruhrgebiet-Mitte 1980–1984

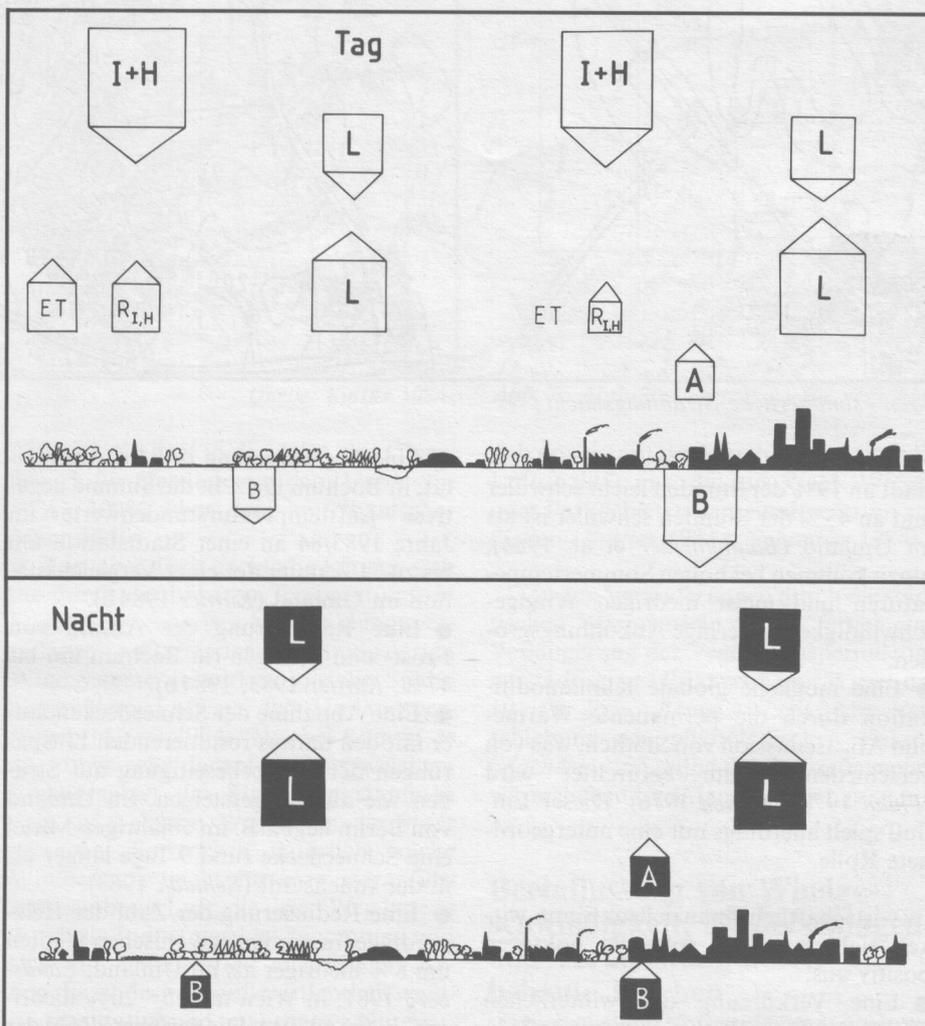


Abb. 4: Strahlungs- und Energieströme im Vergleich Stadt-Umland (Die Flächen der Quadrate entsprechen relativen Vergleichsgrößen)

auch der Schattenwurf der Häuser und die Verlagerung der Heizfläche ins Dachniveau verantwortlich gemacht werden (Weischet 1979).

Von September bis Januar läßt sich für die gleiche Tagesspanne zuerst eine Abschwächung, dann eine allmähliche Umkehrung des thermischen Verhaltens beobachten. Nunmehr ist das Straßenniveau tagsüber nicht mehr kühler, sondern um 1 Kelvin wärmer als das Umland. Im Jahresmittel gleichen sich die Temperaturdifferenzen tagsüber dagegen annähernd aus. Wie aber sieht es nachts und in den frühen Morgenstunden aus?

Von etwa 19 Uhr bis frühmorgens gegen 6 Uhr ist die Stadt z. T. erheblich wärmer als das Umland; ganz besonders groß sind die positiven Temperaturabweichungen während wolkenarmer Nächte, z. B. im April und November sowie in den Sommermonaten, in denen Unterschiede von bis zu 3,5 Kelvin erreicht werden. Im Juli und August lassen sich starke Temperaturunterschiede (bis zu 3 Kelvin) gegen 22 Uhr beobachten; sie lösen sich bei aufgehender Sonne etwa gegen 4 Uhr morgens auf. In den Wintermonaten treten dagegen so hohe nächtliche Temperaturabweichungen wie im Sommer nicht auf. Im Januar liegen die Werte bei nur etwa 1 Kelvin. Dies dürfte u. a. auch auf höhere Windgeschwindigkeiten im Winter zurückzuführen sein. Die hohen nächtlichen Temperaturabweichungen im Sommer weisen auf die einstrahlungsbedingte Überwärmung unserer Städte in der warmen Jahreszeit hin.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß

- die Temperaturunterschiede zur Mittagszeit zwischen Stadt und Umland im Jahresverlauf relativ gering sind,
- es im Sommer im Straßenniveau der Innenstadt sogar geringfügig kühler, im Winter dagegen geringfügig wärmer ist als im Umland,
- in den Nacht- und frühen Morgenstunden die Stadt im Sommer erheblich, im Winter nur wenig wärmer ist als das Umland,
- die städtische Überwärmung ein Phänomen ist, das v. a. nachts auftritt.

Lange Meßreihen von Stadtstationen zeigen in diesem Zusammenhang einen Anstieg der Innenstadtttemperaturen während des Meßzeitraumes (Fukui 1970, Böhm 1979a, Landsberg 1981). Abb. 6 verdeutlicht diesen Sachverhalt anhand einer Meßreihe in der Innenstadt von Bochum. Die hier aufgezeichnete Temperaturerhöhung dürfte nicht nur auf eine horizontale Vergrößerung der Stadtfläche zurückzuführen sein, sondern auch auf den in den letzten Jahrzehnten zu beobachtenden Wechsel der Baumaterialien. Beton besitzt z. B. eine etwa 10mal größere Wärmeleitfähigkeit und eine

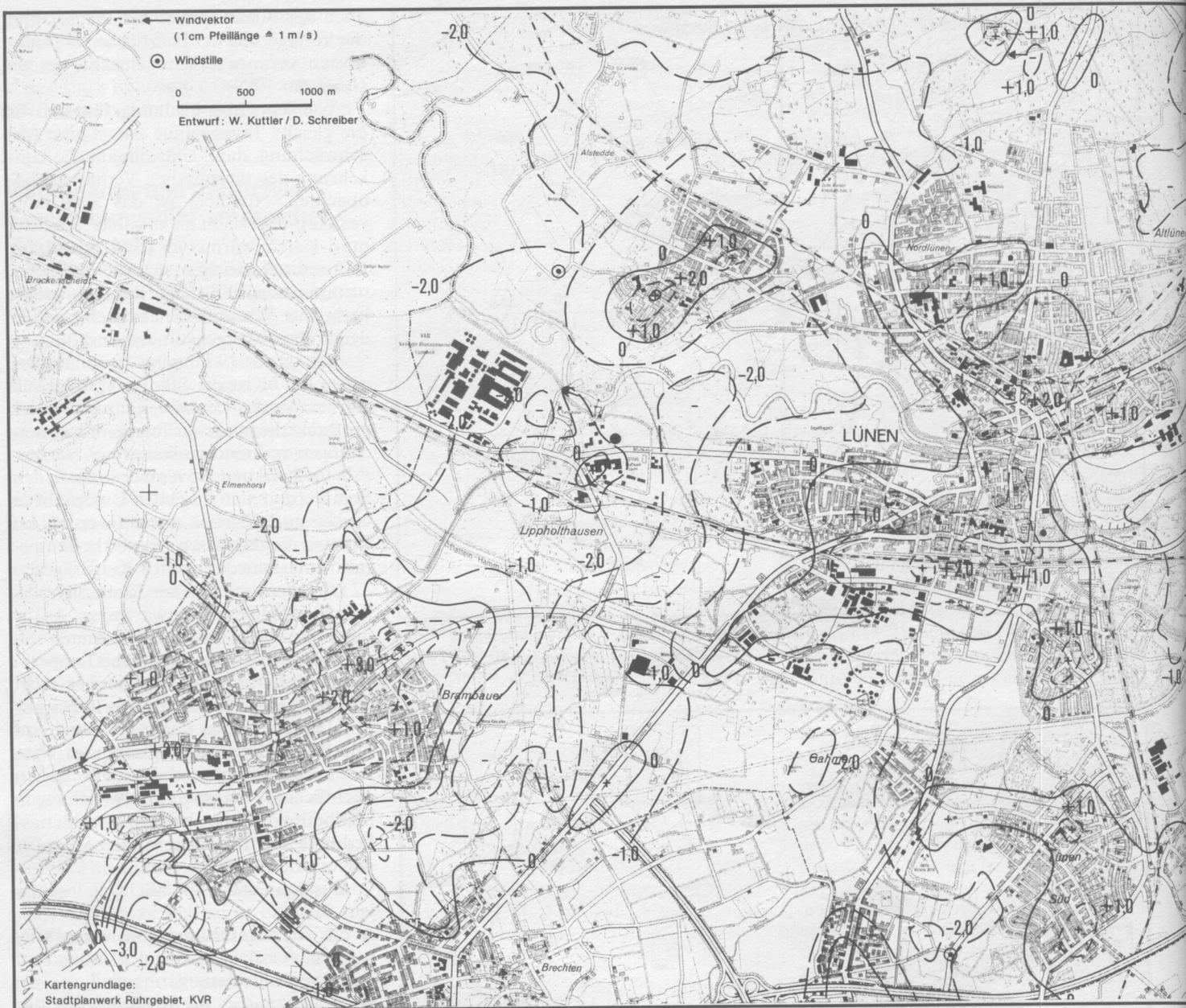


Abb. 5: Isanomalen städtischer Lufttemperaturen (sommerliche Strahlungsnacht)

1,5mal größere Wärmekapazität als Ziegelsteine. Nach Eriksen (1975) vergrößert sich ferner die durch den Hochbau zur Verfügung stehende Fläche für Energieumsatzprozesse um den Faktor sechs, so daß auch hierdurch höhere Temperaturen in Städten verursacht werden können. Darüber hinaus hat in dem oben betrachteten Zeitraum der Straßenverkehr mit seinen Abgas- und Wärmeemissionen außerordentlich stark zugenommen.

### Vor- und Nachteile städtischer Wärmeinseln

Aus der Überwärmung der Städte resultieren für den bioklimatisch-thermischen und wirtschaftlich-finanziellen Bereich sowohl Vor- als auch Nachteile.

Nachteilig wirken sich aus:

- Größere Schwülerraten in den Innenstädten im Vergleich zum Stadtrand bzw. zum Umland. Für München wurde nach-

gewiesen (Tab. 3), daß es in der Innenstadt an 19% der Stunden leicht schwüler und an 45% der Stunden schwüler ist als im Umland (Baumgartner et al. 1984); hinzu kommen bei hohen Sommertemperaturen und meist niedrigen Windgeschwindigkeiten geringe Abkühlungsgrößen.

- Eine mögliche globale Klimamodifikation durch die permanente Wärme- und Abgasemission von Städten, was von verschiedener Seite befürchtet wird (Flohn 1970; Eriksen 1976). Dieser Einfluß spielt allerdings nur eine untergeordnete Rolle.

In wirtschaftlich-finanziellen Sinne wirken sich vor allem folgende Faktoren positiv aus:

- Eine Verkürzung der winterlichen Frostperiode (in Wien z. B. um etwa 25% (Böhm 1979 b); in Bochum ebenfalls um 25% (Kuttler 1984 b).

- Eine Verminderung der Frostintensität; in Bochum lag z. B. die Summe negativer Lufttemperaturstundenwerte im Jahre 1983/84 an einer Stadtstation um bis zu 71% unter der einer Vergleichsstation im Umland (Kuttler 1984 b).

- Eine Reduzierung der Anzahl von Frost- und Eistagen (in Bochum um bis 47%, Kuttler 1983, 1984 b).

- Eine Abnahme der Schneedeckendauer mit den daraus resultierenden Einsparungen der Schneebeseitigung auf Straßen wie auf Bürgersteigen. Im Umland von Berlin liegt z. B. im 60jährigen Mittel eine Schneedecke rund 9 Tage länger als in der Innenstadt (Schlaak 1963).

- Eine Reduzierung der Zahl der Heizgradtage (in nordamerikanischen Städten um 8% niedriger als im Umland, Landsberg 1981; in Wien um 15–20% niedriger, Böhm 1979 a). Die geringere Zahl der Heizgradtage schlägt sich natürlich auch auf den Heizenergieverbrauch nieder



Quelle: Kuttler 1984c

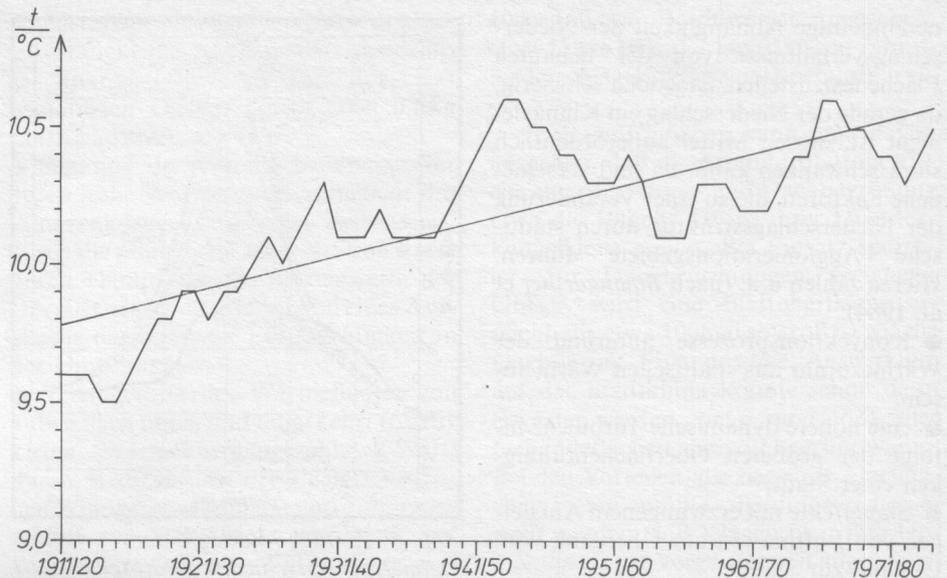
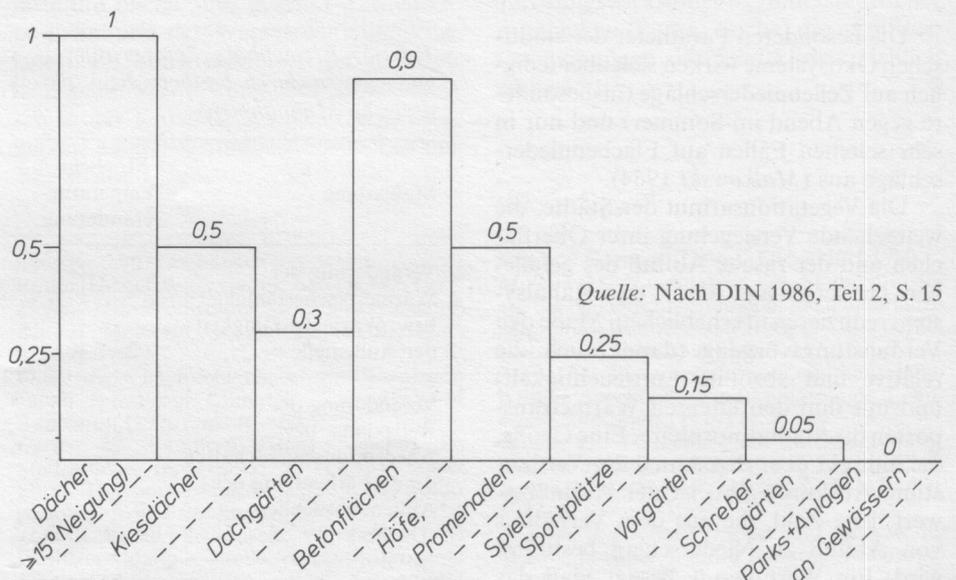


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der Lufttemperaturen an einer Innenstadtstation (Bochum)

Quelle: Werte nach Westfälischer Berggewerkschaftskasse aus Kuttler 1984a



Quelle: Nach DIN 1986, Teil 2, S. 15

Abb. 7: Abflußbeiwerte (ψ) für verschiedene Oberflächen

(Tab. 4). So liegt in den USA der Ölverbrauch für Gebäude auf dem Lande um 50%–100% über dem amerikanischen Innenstädte.

● Vor- aber auch nachteilig können sich die durch die höheren Temperaturen in Städten insbesondere bei Strahlungswetterlagen auftretenden stadtinduzierten Windsysteme auswirken, die die Städte mit kühlerer Luft aus dem Umland versorgen (Miess 1974). Hierbei kommt es allerdings sehr darauf an, aus welchem Einzugsgebiet die Flurwinde stammen und auf welchem Weg sie in die Stadt gelangen. So sorgen natürlich solche Windsysteme nicht für eine Heranführung sauberer Luft, die ihren Weg bereits durch ein Industriegebiet genommen und sich mit Schadstoffen angereichert haben. Es ist deshalb außerordentlich wichtig, qualitative und quantitative Untersuchungen über potentielle Kühlluftströme durchzuführen, denn nur solche wirken

sich positiv auf die Durchlüftung und die Luftqualität aus, die aus Wald, Wiesen oder Parkgebieten dem Stadtzentrum zufließen (Kuttler 1984c, Schreiber 1984).

Zu den Veränderungen durch die städtischen Wärmeinseln zählen ferner eine Verlängerung der Vegetationsperiode innerstädtischer Pflanzen (in Wien um 10–20 Tage, Böhm 1979b), eine Verschiebung der phänologischen Phasen (Zacharias 1972) und das Auftreten neuer wärmeliebender Pflanzenarten.

### Beeinflussung von Windgeschwindigkeit, Niederschlägen und Verdunstung durch bebauten Flächen

Neben dem Vorhandensein positiver Temperaturanomalien in bebauten Flächen üben Städte aufgrund der größeren

Rauhigkeit ihrer Oberflächen einen beträchtlichen Einfluß auf das bodennahe Windfeld aus. Im allgemeinen sind die mittleren Windgeschwindigkeiten reduziert, der Anteil der Böen gegenüber dem Umland häufig erhöht (Stiemer 1977). Für verschiedene urbane Meßstationen berechnete langjährige Zeitreihen zeigen sehr deutlich eine mit dem Stadtwachstum korrelierende Abnahme der Windgeschwindigkeiten.

Stadteigene Windsysteme lassen sich dagegen ausschließlich während Strahlungswetterlagen beobachten und führen bei geringen Windgeschwindigkeiten kühle Luft aus dem Umland in die überwärmten Städte.

Stadtbedingte Einflüsse auf die Niederschlagsstruktur sind in der Literatur vielfach beschrieben worden (Eriksen 1972, Havlik 1981, Landsberg 1981). In den meisten Arbeiten werden urbane Niederschlags erhöhungen nachgewiesen. Ei-



Abb. 5: Isanomalien städtischer Lufttemperaturen (sommerliche Strahlungsnacht)

ne eindeutige Abhängigkeit der Niederschlagsverhältnisse von der bebauten Fläche festzustellen, ist jedoch schwierig, da gerade der Niederschlag ein Klimaelement ist, dessen Mittel außerordentlich stark schwanken kann. Es sind verschiedene Faktoren, die zu einer Veränderung der Niederschlagsstruktur durch städtische Agglomerationsgebiete führen. Hierzu zählen u. a. (nach Baumgartner et al. 1984):

- Konvektionsprozesse aufgrund der Wärmezufuhr aus städtischen Wärmeinseln;
- eine höhere dynamische Turbulenz infolge der größeren Oberflächenrauigkeit einer Stadt;
- Staueffekte mit erzwungenem Aufsteigen von Luftmassen am Übergang vom Umland zur Stadt;
- die Vermehrung von Kondensationskernen durch anthropogene Zufuhr (Verkehr, Hausbrand, Industrie).

Die besonderen Parameter der städtischen Ökosysteme wirken sich aber lediglich auf Zelleniederschläge (insbesondere gegen Abend im Sommer) und nur in sehr seltenen Fällen auf Flächenniederschläge aus (Malkowski 1964).

Die Vegetationsarmut der Städte, die weitgehende Versiegelung ihrer Oberflächen und der rasche Abfluß des gefallenen Niederschlags durch das Kanalsystem reduzieren in erheblichem Maße den Verdunstungsvorgang (damit auch die relative und absolute Luftfeuchtigkeit) und mit ihm den latenten Wärmetransport in die Stadtatmosphäre. Eine Größe, die indirekt über den Anteil der Verdunstung Auskunft gibt, ist der Abflußbeiwert, jene Zahl, die aus dem Verhältnis von Abfluß zu Niederschlag bestimmt wird. Ein Wert von 1 besagt, daß das gefallene Niederschlagswasser – im Idealfall – gänzlich abfließt und nicht verdunstet. Für die in Städten vorhandenen künstlichen Oberflächen (Straßen, Plätze, Hausdächer, Schienenanlagen u. a. m.) ergeben sich relativ hohe Abflußbeiwerte (Abb. 7). Dächer und Betondecken erreichen Werte zwischen 1 und 0,9, d.h. nur bis zu 10% des Niederschlagswassers verdunstet. Je mehr natürliche speicherfähige Oberflächen vorherrschen, um so geringer ist der Wasserabfluß, desto stärker die Verdunstung, wodurch den benetzten Oberflächen Verdunstungswärme entzogen (etwa  $2500 \text{ J g}^{-1}$  Wasser) und somit die Lufttemperatur der Umgebung gesenkt wird. Sport- und Spielplätze, Vorgärten und Schrebergärten aber auch begrünte Steinhalden zeichnen sich durch hohe Verdunstungsraten (bei gleichzeitig recht geringem Abfluß) aus. In Parks und Anlagen an Gewässern erreicht der Abfluß noch geringere Werte bzw. wird praktisch Null.

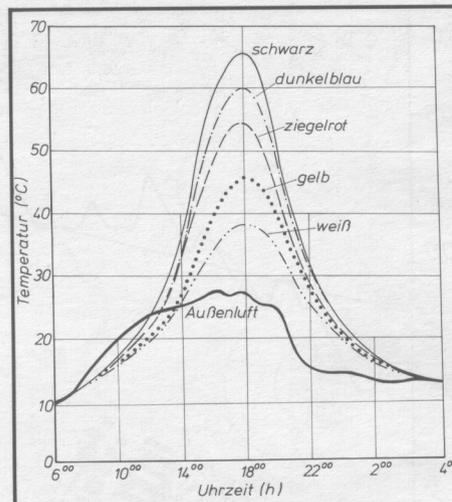


Abb. 8: Zeitliche Verläufe der Temperatur verschieden gefärbter Außenoberflächen (Westwände) an einem strahlungsreichen Sommertag  
Quelle: Künzel u. Gertis 1969 aus Gertis 1977

Tab. 5: Erreichbare Temperaturveränderungen durch bauliche bzw. planerische Maßnahmen<sup>1</sup>

Maßnahme	Mögliche Temperaturveränderung
Veränderung der Wärmespeicherfähigkeit bzw. Wärmeleitfähigkeit der Außenteile	2 – 5 K
Veränderung der Reflexions- bzw. Absorptionseigenschaften durch Farbgebung der Außenoberflächen (Dächer)	bis ca. 10 K
Veränderung der hydraulischen Bodenrauigkeit durch aufgelockerte Bebauung	10 – 12 K
Schaffung von Verdunstungsflächen (Parkanlagen, Begrünung von Dächern usw.)	15 – 25 K

<sup>1</sup> Es handelt sich hierbei um Angaben zur mittleren Oberflächentemperatur größerer terrestrischer Flächen; die Temperaturen dieser Flächen können durch die erläuterten Maßnahmen um die jeweils aufgeführten Beträge beeinflusst werden.  
Quelle: Gertis 1977

### Planerische Möglichkeiten zur Verbesserung des Stadtklimas

Bebauungspläne werden im Entwurfstadium von den verschiedensten Interessengruppen beeinflusst; bedauerlicherweise wird auch heutzutage noch häufig versäumt, klimatologisches Wissen in hinreichendem Maße zu berücksichtigen.

Dabei sollte schon im ersten Planungsstadium dafür gesorgt werden, daß

- eine stadtbedingte Überwärmung mit der daraus resultierenden größeren Schwüleneigung durch Anlage von Grünflächen, Grünkorridoren oder „Grünfingern“ (Adam/Grohé 1984; Brahe 1974) auszuschalten ist;
- genügend Luftleitbahnen für ein funktionierendes Flurwindssystem (Frischlufschneisen) geschaffen werden (Fezer 1977);
- die Hausbrandemissionen durch die Verwendung von Fernwärme niedrig gehalten werden (in der Stadt Flensburg sind z.B. bereits 90% der Haushalte an das Fernwärmenetz angeschlossen, vgl. dazu auch Adam i. d. Heft);
- die Kfz-Emissionen durch das Angebot eines optimalen Nahverkehrssystems weitgehend ausgeschlossen werden;
- abgasintensive Industrien in unserem Klimabereich am Nordrand der Städte errichtet werden und nicht im Leebereich zur vorherrschenden Windrichtung, da in einem solchen Fall die dort freigesetzten Abgase bei einer austauscharmen Wetterlage mit geringen Windgeschwindigkeiten aus östlicher Richtung und niedriggelegener Mischungsschichthöhe in die Stadt geleitet werden (Schwegler 1967; Kuttler/Schreiber 1984).

Diese Probleme im nachhinein in unseren Städten lösen zu wollen, bereitet naturgemäß größere Schwierigkeiten als sie im Planungsstadium vorab zu berücksichtigen. Verhältnismäßig einfach dürfte es sein, stadt-eigene Fahrzeuge mit Elektromotoren, mindestens aber schon jetzt mit Katalysatoren auszurüsten. Nötig sind allerdings großzügige Lösungen. Sie durchzuführen, beispielsweise durch Schaffung verdunstungsaktiver Flächen und Auflockerung der bebauten Gebiete durch Einschaltung von Luftleitbahnen läßt das geringe Platzangebot in den Agglomerationsräumen allerdings meist nicht mehr zu. Gefragt sind somit insbesondere realisierbare Möglichkeiten, die nachträglich zu einer Verbesserung der Lebensqualität unserer Ballungsräume führen. Dabei sollte insbesondere denjenigen Maßnahmen eine erhöhte Aufmerksamkeit zufallen, die – weil platzsparend – auch an einzelnen Gebäuden vorgenommen werden können. In Tab. 5 sind einige Möglichkeiten genannt, durch die z. B. hohe Außenlufttemperaturen gesenkt bzw. verhindert werden können.

Beispiele für die Reduzierung der Oberflächentemperaturen durch Erhöhung des Reflexionsgrades enthält Abb. 8. So steigt z. B. bei einer maximalen Außenlufttemperatur von ca.  $28^\circ\text{C}$  die Oberflächentemperatur einer schwarz gestrichenen Westwand gegen 18 Uhr auf rund  $65^\circ\text{C}$ . Ist die Außenwand dagegen in helleren Farbtönen gehalten, z. B. in

gelb oder weiß, so sinken die maximalen Temperaturunterschiede auf unter 40 °C ab.

Das für die Wände Gesagte gilt selbstverständlich auch für Flachdächer, die (noch häufig) mit schwarzer, die Wärme stark absorbierender Bitumenpappe versiegelt sind. Oberflächentemperaturmessungen auf solchen Dächern zeigten Werte von bis zu 90 °C; bei Bedeckung mit hellem Kies sank durch die verstärkte kurzwellige Reflexion die Oberflächentemperatur bereits um rund ein Drittel (Gertis 1977).

Noch wesentlich wirkungsvoller lassen sich zur Überwärmung neigende Oberflächen an Bauwerken verhindern, wenn an diesen Dach- und/oder Fassadenbegrünungen mit immer- oder sommergrünen Kletterpflanzen vorgenommen werden, die in außerordentlich mannigfaltiger Weise positiv auf das bauwerksnahe Mikro- und Mesoklima einzuwirken vermögen.

So führt aus klimatischer Sicht eine Begrünung von Hauswänden und Flachdächern zu folgenden Veränderungen (unter Verwendung von Minke 1982):

- Reduzierung von Luftverunreinigungen in Hausnähe durch Erhöhung der

schadstoffspezifischen Ablagerungsgeschwindigkeiten partikel- und gasförmiger Spurenstoffe. 1 m<sup>2</sup> eines mit Gras bepflanzten Daches bindet etwa 0,5 kg Luftschadstoffe pro Jahr.

- Senkung der Oberflächentemperatur durch hohe Wärmespeicherfähigkeit des Pflanzenkörpers und seines Zellwassers, durch die pflanzliche Transpiration sowie durch Dämpfung der Extremwerte der Oberflächentemperaturen und eines Ausgleichs der relativen Luftfeuchtigkeit in der Umgebung.

- Verringerung des Wärmeflusses von außen nach innen und umgekehrt (relativ kleine Wärmeübergangszahl, k-Wert) durch Reduzierung der oberflächennahen Windgeschwindigkeit und durch Einschluß von meist nicht zirkulierenden, kaum wärmeleitenden Luftpolstern zwischen Pflanze und Hauswand. Hierdurch können während einer Heizperiode an luvseitigen Hauswänden die Wärmeverluste um bis zu 50% gesenkt werden.

Erhöhung der Wasserrückhaltefähigkeit nach Starkregen mit der dadurch bedingten Vermeidung von Abflussspitzen in der Kanalisation (die Speicherfähigkeit eines begrünten Hausdaches mit 20–40 cm Substratdicke wird mit

100–150 mm Regenwasser angegeben, etwa 12 bis 19% der langjährigen Jahresniederschlagssumme von Bochum).

Insgesamt gesehen kann man davon ausgehen, daß die gesamte Blattoberfläche einer Fassaden- und Dachbegrünung etwa die 10fache Größe ihrer Überdeckungsfläche besitzt. Bei Einsatz spezieller, für Dachbegrünungen geeigneter Gräser, wird eine Blattoberfläche erreicht, die etwa 100mal so groß ist wie die Dachfläche. Eine positive Auswirkung auf das Stadtklima könnte schon dann erwartet werden, wenn rund 10% aller Gebäudeflächen sinnvoll begrünt wären. Bei den Vorteilen, die begrünte Flachdächer bieten, müßte allerdings sichergestellt werden, daß Klagen über ihre Undichtigkeit der Vergangenheit angehören.

Weiterhin ließen sich durch eine vernünftige Grünplanung in Form des Straßenbegleitgrüns und der Schaffung verdunstungswirksamer innerstädtischer Freiflächen (Parks, Teiche) die negativen Erscheinungen des Stadtklimas vielfach verbessern. ●

## Literatur

Adam, K., u. T. Grohé: Ökologie und Stadtplanung. Erkenntnisse und praktische Beispiele integrierter Planung. Köln 1984.

Bach, W.: Strahlungshaushalt und lufthygienische Verhältnisse in Groß-Cincinnati, USA. Dtsch. Geogr. Tag Kiel 1969. 1970, S. 273–282.

Baumgartner, A., H. Mayer, W. Bründl, P. Höpfe u. E.-M. Noack: Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten. Forschungsvorhaben Nr. 8272-VI/4b-7106 i. A. Bay. Staatsminister. Landesentw. u. Umwelt. Bericht für das Jahr 1983 sowie Kurzzmitt. Nr. 7, beide München 1984.

Blüthgen J., u. W. Weischet: Allgemeine Klimageographie. Lehrbuch der allgemeinen Geographie 2. Berlin 1980.

Böhm, R.: Stadtentwicklung und Trend der Wärmeinselintensität. Arch. Meteorol. Geophys. Biokl., Ser. B, 27 (1979a) S. 31–46.

Ders.: Meteorologie und Stadtplanung in Wien – ein Überblick. Wetter u. Leben 31 (1979b) S. 1–11.

Brahe, P.: Klimatische Auswirkungen von Gehölzen auf umbauten Stadtplätzen. Das Gartenamt 2 (1974) S. 57–70.

DIN 1986: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke. Teil 2. Bestimmungen für die Ermittlung der lichten Weiten und Nennweiten für Rohrleitungen, Sept. 1978.

Eriksen, W.: Zur Niederschlagsmodifikation im Bereich von Großstädten. Städtehygiene (1972) S. 164–166.

Ders.: Probleme der Stadt- und Geländeklimatologie. (Erträge der Forschung, Bd. 35). Darmstadt 1975.

Ders.: Die städtische Wärmeinsel. GR 28 (1976) H. 9, S. 368–373.

Ders.: Grundlagen und städtebauliche Bedeutung des Stadtklimas. Spektrum des Wissens 72 (1979) H. 2/3/4, S. 77–81.

Fezer, F.: Klimauntersuchungen als Planungshilfe. In: Fezer, F., u. R. Seitz (Hrsg.): Klimato-

logische Untersuchungen im Rhein-Neckar-Raum (Heidelberger Geogr. Arb., H. 47) 1977.

Flohn, H.: Produzieren wir unser eigenes Klima? Meteorol. Rdsch. 23 (1970), H. 6, S. 161–164.

Fukui, E.: The recent rise of temperature in Japan. Jpn. Progr. Climatol., Tokyo Univ. of Education (1970) pp. 46–65.

Gertis, K.: Bauphysikalische Aspekte des Stadtklimas. In: Franke, E. (Hrsg.): Stadtklima. Ergebnisse und Aspekte für die Stadtplanung. S. 87–96. Stuttgart 1977.

Havlik, D.: Großstädtische Wärmeinsel und Gewitterbildung – ein Beispiel anthropogener Klimamodifikation. (Aachener Geographische Arbeiten, H. 14). 1981, S. 91–109.

Kuttler, W.: Klimatologische Untersuchungen im Raum Bochum – Wattenscheid – Essen (unveröff. Zwischenbericht im Auftrag des Kommunalverbandes Ruhrgebiet, Essen (masch.schr.) 1983, 149 Seiten.

Ders.: Untersuchungen zum Bochumer Stadtklima. In: Ges. d. Freunde d. Ruhr-Universität Bochum (Hrsg.): Jahrbuch Ruhr-Universität Bochum 1984 (1984a), S. 99–114.

Ders.: Klimatologische Untersuchungen im Raum Bochum – Wattenscheid – Essen (unveröff. Abschlußbericht im Auftrag des Kommunalverbandes Ruhrgebiet, Essen (masch.schr.) 1984b.

Ders.: Stadtklimatologische Untersuchungen in Lünen. In: Kuttler, W., u. D. Schreiber (Hrsg.): Stadt- und geländeklimatische Untersuchungen im südlichen Münsterland, (Materialien zur Raumordnung, Bd. XXV Geogr. Inst. Ruhr-Univ. Bochum) Bochum 1984c, S. 15–76.

Kuttler, W., u. D. Schreiber (Hrsg.): Stadt- und geländeklimatische Untersuchungen im südlichen Münsterland (Materialien zur Raumordnung, Bd. XXV, Geogr. Inst. Ruhr-Univ. Bochum) Bochum 1984.

Landsberg, H.E.: The Urban Climate. Internat. Geophys. Ser. Vol. 28. New York 1981.

Luftreinhalteplan Ruhrgebiet Mitte (1980–1984) Ministerium f. Arbeit, Gesund-

heit und Soziales (Hrsg.), Düsseldorf 1980.

Malkowski, G.: Analyse des Stadteinflusses auf die Niederschlagstätigkeit nach mehrjährigen Wetterradarbeobachtungen in Berlin. Wetter u. Leben 16 (1964) S. 147–152.

Miess, M.: Planungsrelevante und kausalanalytische Aspekte der Stadtklimatologie. Landschaft und Stadt (1974) H. 1, S. 9–16.

Minke, G.: Fassaden- und Dachbegrünung. Ein ökonomischer Beitrag zum ökologischen Bauen. In: U. Schwarz (Hrsg.): Grünes Bauen. 1982, S. 149–173.

Nübler, W.: Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg. (Freiburger Geogr. H., 16). Freiburg 1979.

Oke, T. R.: The energetic basis of the urban heat island. In: Quart. J. R. Met. Soc. (1982) Nr. 108, S. 1–24.

Raschke, E.: Der Strahlungshaushalt über Stadtgebieten. promet 4 (1979) S. 17–20.

Schlaak, P.: Die Wirkung der bebauten und bewaldeten Gebiete auf das Klima des Stadtgebietes von Berlin. Allg. Forst. 29 (1963) S. 455–458.

Schreiber, D.: Stadtklimatologische Untersuchungen in Recklinghausen. In: Kuttler, W., u. D. Schreiber (Hrsg.): Stadt- und geländeklimatische Untersuchungen im südlichen Münsterland (Materialien zur Raumordnung, Bd. XXV, Geogr. Inst. Ruhr-Univ. Bochum). 1984, S. 77–103.

Schwegler, H.: Die meteorologische Lage Münchens im Hinblick auf die Verunreinigungen der Atemluft. Meteorol. Rdschau 20 (1967) H. 6, S. 168.

Stiemer, S. F.: Windumströmung von Gebäuden und Gebäudeklima. In: Franke, E. (Hrsg.): Stadtklima. 1977, S. 77–111.

Weischet, W.: Problematisches über die städtische Wärmeinsel und die Notwendigkeit einer Baukörperklimatologie. Siedlungsgeographische Studien (1979) S. 407–423.

Zacharias, F.: Blühphaseneintritt an Straßebäumen (insbes. Tilia x enchlora KOCH) und Temperaturverteilung in Westberlin. Berlin 1972.