

Stadtklimatologie



Landesbildstelle Westfalen



Landschaftsverband
Westfalen-Lippe

Westfalen im Bild

eine Bildmediensammlung zur
westfälischen Landeskunde

herausgegeben im Auftrage
des Landschaftsverbandes Westfalen-Lippe
von Wolfgang Linke

Schriftleitung: Hermann-Josef Höper

Reihe:

Grundlagen und Probleme
der Ökologie

Heft 4



Landschaftsverband Westfalen-Lippe
Landesbildstelle Westfalen

Stadtklimatologie

Wilhelm Kuttler

Redaktion: Hermann-Josef Höper
Umschlagentwurf: Günter Schmidt

Fotonachweis: Motive 8, 9 Kommunalverband Ruhrgebiet; Motiv 14 A. Pflitsch

Grafik: Computerdesign Bernd Terwey, Dipl. Des., Emsdetten
Satz: Photosatz Typotext GmbH, Münster
Druck: Druckhaus Tecklenborg, Steinfurt

Anschrift:
Landschaftsverband Westfalen-Lippe
Landesbildstelle Westfalen
Warendorfer Straße 24
4400 Münster
Telefon: (02 51) 5 91 3902
5 91 3907

© 1987 Landschaftsverband Westfalen-Lippe

Einleitung

Das Interesse an der Stadtklimatologie hat in den letzten Jahren sowohl von fachwissenschaftlicher als auch planungsorientierter Seite außerordentlich stark zugenommen.

Wählt man als Indikator für die verstärkte Beschäftigung mit diesem Wissenschaftszweig die Zahl der Veröffentlichungen, die über dieses Thema angefertigt wurden, so läßt sich folgende Entwicklung erkennen:

Die von Pater Albert KRATZER im Jahre 1937 geschriebene Dissertation über „Das Stadtklima“ enthielt 225 Literaturangaben; die zweite Auflage dieses über Jahre hinweg sehr wichtigen grundlegenden Werkes über das Klima der Städte wies im Literaturverzeichnis schon 533 Titel auf, die zusammenfassend bearbeitet worden waren. (Die Arbeiten von KRATZER sind in LANDSBERG 1981 zitiert). CHANDLER (1970), der für die World Meteorological Organization eine Bibliographie zum Thema Stadtklimatologie zusammenstellte, konnte bereits auf rund 1800 Arbeiten dieses immer wichtiger werdenden Wissenschaftszweiges der Klimatologie zurückgreifen. Heutzutage dürfte die Zahl der Aufsätze, die sich direkt und indirekt mit der Stadtklimatologie beschäftigen, auf weit über 3000 angewachsen sein (LANDSBERG 1981).

Auf die Frage, wieso das Interesse an dieser Wissenschaftsdisziplin derartig angestiegen ist, antwortet der kürzlich verstorbene Altmeister der Stadtklimatologie LANDSBERG in seinem 1981 erschienenen Grundlagenwerk: „The reason is simple. Cities and metropolitan areas have grown into vast conurbations, where a variety of human influences impinge on the local atmosphere – and the end is not in sight“ (LANDSBERG 1981, S. 2).

Nach den von LANDSBERG (a.a.O) zitierten Berechnungen der Vereinten Nationen werden am Ende des 20. Jahrhunderts über 6 Milliarden Menschen auf der Erde leben – 50% davon in Städten.

Tabelle 1

Anteile der Bevölkerung in Städten über 20 000 Einwohner in Prozenten (nach SCHÖLLER 1983)

Großregionen (Auswahl)	1920	1940	1960	1980	2000 Schätzung*
Erde insgesamt	14	19	25	46	51
Stärker entwickelte Gebiete	30	37	46	70	80
<i>Europa</i>	35	40	44	65	71
<i>Nordamerika</i>	41	46	58	81	87
<i>Sowjetunion</i>	10	24	36	68	85
Weniger entwickelte Gebiete	7	10	17	32	43
<i>Südasien</i>	6	8	14	25	35
<i>Lateinamerika</i>	14	20	33	60	80
<i>Afrika</i>	5	7	13	28	39

* Anteil der Bevölkerung in „Städten“ – nach nationaler Definition – an der Gesamtbevölkerung.

SCHÖLLER (1983) zeigt anhand des in Tabelle 1 zusammengestellten Datenmaterials, daß für das Jahr 2000 in den stärker entwickelten Gebieten der Erde – mithin in Europa, Nordamerika und der Sowjetunion – davon auszugehen ist, daß im Durchschnitt 80% der Bevölkerung in Städten über 20 000 Einwohner leben.

In den weniger entwickelten Gebieten werden dann 43% der Menschen in städtischen Agglomerationen wohnen, wobei in diesem Zusammenhang der außerordentlich hohe Anteil der Stadtbevölkerung in Lateinamerika hervorgehoben werden soll.

Der ungehinderte Zuzug von Menschen in die Stadtlandschaften wirft soziale, wirtschaftliche, finanzielle, insbesondere aber auch große planerische Probleme auf, zumal in absehbar kurzer Zeit einige Weltmetropolen die 20-Millionen-Einwohner-Marke überschritten haben dürften.

Damit verbunden sind aber auch Änderungen des Stadtklimas, die zu eklatanten Einbußen an Umweltqualität führen. Um welche handelt es sich dabei?

Schon – wissenschaftsgeschichtlich – früh wurde von Luke HOWARD (1772-1864) in seinem 1833 erschienenen Buch festgestellt (zitiert in LANDSBERG 1981), daß die Stadt London im Vergleich zu ihrem Umland wärmer ist, und zwar in den Wintermonaten um etwa 1,8° F, in den Sommermonaten um etwa 1,1° F. HOWARD führte diese Unterschiede der Lufttemperaturen, die nach seinen Messungen im Winter stärker ausgeprägt waren als im Sommer, vornehmlich auf den extensiven Verbrauch von Brennstoffen zu Heiz- und Kochzwecken zurück.

Darüber hinaus konnte HOWARD aufgrund seiner sehr genauen Beobachtungen und Messungen zum winterlichen Nebelproblem (der Begriff „City-fog“ wurde von ihm geprägt) die Verräucherung der Londoner Innenstadt durch Smog lokalisieren und von dem viel häufiger nebelfreien Umland trennen.

Auch über 150 Jahre später sind diese bereits von HOWARD und in der Folgezeit von zahlreichen Klimatologen nachgewiesenen stadtbedingten Klimaeffekte, die im Meso- und Mikrobereich der Ballungsräume angesiedelt sind, Gegenstand der Forschung.

Aufgrund eines insbesondere in den letzten beiden Jahrzehnten erheblich verfeinerten Meß- und Analyseinstrumentariums konnte die Forschung weiter vorangetrieben werden.

Heute geht es bei stadtklimatologischen Untersuchungen im wesentlichen um die Klärung folgender Fragen:

1. Nachweis der von der Baukörperstruktur bestimmten städtischen Überwärmungsgebiete in Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit.
2. Erfassung der Windverhältnisse bei austauschreichen und austauscharmen Wetterlagen im Hinblick auf die Verteilung von Luftschadstoffen.
3. Messung der Temperaturschichtung der Atmosphäre und der Vertikalgeschwindigkeit bei austauscharmen Wetterlagen, um Kenntnisse für die horizontale/vertikale Be- und Entlüftung zu erhalten.
4. Bestimmung der kleinräumigen Immission gasförmiger und partikelgebundener Spurenstoffe.

5. Festlegung von Gebieten, die über Luftaustauschbahnen den Stadtkörper bei Schwachwindwetterlagen mit kühler Frischluft versorgen.
6. Bestimmung der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit zur Ermittlung von Schwülebereichen in der Stadt.
7. Versuch, mit Hilfe der vorgenannten Datenerfassung stadtklimatologische Modelle zu entwerfen.
8. Umsetzen der erfaßten Meßwerte in sogenannte Klimafunktionskarten, die für die Anwendung in der Planungspraxis bestimmt sind.

Die vorliegende Diaserie versucht einige dieser Fragen aufzugreifen und mit Hilfe von Beispielen zu beantworten.

Ausgehend von einer Zusammenstellung der klimatischen Unterschiede zwischen Stadt und Umland (Dia 1) werden nachfolgend Einzelprobleme des Stadtklimas behandelt, wie der urbane Strahlungs- und Wärmehaushalt (2) und die unterschiedlich hohe Sonnenscheindauer in Stadt und Umland (3).

Anschließend wird die Änderung der städtischen Flächennutzung und des Kraftfahrzeugbestandes untersucht (4) und den Fragen nach dem Zusammenhang zwischen Einwohnerzahl und Wärmeinselintensität (5) sowie der anthropogenen Wärmeproduktion städtisch bebauter Flächen nachgegangen (6).

In einem weiteren Diapositiv wird dargestellt, wie sich der farbige Anstrich von Gebäudeaußenteilen auf die Höhe der Oberflächentemperaturen auswirkt (7). Anhand zweier Infrarotaufnahmen, die für das Stadtgebiet von Recklinghausen angefertigt wurden, wird gezeigt, wie unterschiedlich hoch die Ausstrahlungstemperaturen städtischer Oberflächen in der Nacht und am Tage sind. Das Stadtgebiet erscheint als thermisches Mosaik, das die in unterschiedlicher Stärke abstrahlende Energie der einzelnen Flächen repräsentiert (8 und 9).

Die Wärmeinseln der städtischen Baukörper unterliegen im Tages- und Jahresgang einem deutlichen Wechsel ihrer Intensität. Dies wurde festgehalten am Beispiel eines Thermoisoplethendiagramms, in das die stündlichen Differenzen der Lufttemperaturen zwischen Stadt- und Umland für ein Jahr eingetragen wurden (10).

Daß die baukörperbedingte Überwärmung auch positive (finanzielle) Seiten hat, zeigt sich in der unterschiedlichen Anzahl an Heizgradtagen innerhalb eines Stadtgebiets: dichtbebaute Viertel weisen deutlich weniger Heizgradtage auf als mehr grünlandbestimmte, locker bebaute (11).

Dies kann schon als Hinweis dafür gewertet werden, daß neben der zeitabhängigen Veränderung der Stadttemperaturen auch eine räumliche Heterogenität der thermischen Verhältnisse zu erwarten ist. Anhand einer Isanomalendarstellung für die Lufttemperatur wird deren Verteilung auf das Stadtgebiet von Lünen während eines sommerlichen Strahlungstages gezeigt (12).

Im Vergleich zum Umland unterliegt die Lufttemperatur in der Stadt einer langsameren Veränderung. Das beruht auf der größeren Oberfläche des Stadtkörpers und der höheren Materialdichte, wodurch mehr eingestrahelte Energie in die vorhandene Bausubstanz abgeleitet wird. Das spiegelt sich auch wider in den unterschiedlichen Temperaturamplituden, die in der Stadt niedriger sind als im Umland (13).

Baukörper und Vegetation beeinflussen sich wechselseitig in einem Stadtgebiet. Einerseits können Grünflächen und Bewuchs an Häusern die überwiegend als

negativ empfundenen Einflüsse des Stadtklimas mildern, wie z.B. mit Efeu oder wildem Wein bewachsene Hauswände zu einer Senkung der Oberflächentemperaturen führen und dadurch ein behaglicheres Innenraumklima schaffen (14); andererseits bestimmen die höheren Stadttemperaturen die phänologischen Phasen, was durch eine sehr lange Meßreihe, die für die Stadt Genf vorliegt, gezeigt werden kann (15).

Zwischen dem Auftreten des ersten und letzten Frostes können in Abhängigkeit von der Stadtgestaltung bis zu zwei Monate liegen; auch die Anzahl der Frosttage variiert innerhalb eines Stadtgebietes sehr stark (16).

Der Verteilungskarte der Luftfeuchtigkeit ist zu entnehmen, daß trotz geringer Entfernung innerhalb einer Stadtfläche recht hohe Unterschiede auftreten können, insbesondere dann, wenn – wie im vorliegenden Beispiel – ein Fluß das Stadtgebiet quert (17).

Verstärkte Konvektion, erhöhte Rauigkeit und ein großes Angebot an Kondensationskernen sollen die Gründe für ein häufigeres Auftreten von Starkregen in Städten sein. Die für die vorliegende Untersuchung ausgewählten Orte machen wahrscheinlich, daß ein solcher Zusammenhang besteht. Bei niedrigen Einwohnerdichten und geringer Flächengröße sind weniger kräftige Niederschläge zu erwarten als in Großstädten (18).

Daß der Versiegelungsgrad einen großen Einfluß auf das abfließende Regenwasser hat und damit indirekt auf die Verdunstung und den latenten Wärmestrom, zeigt für typische, bebaute und nicht bebaute Oberflächen eine Datenzusammenstellung in Dia 19.

Das Problem der Windüberströmung und der Windverteilung in Städten wird allgemein und für den speziellen Fall austauschhemmender Wetterlagen in den folgenden Diapositiven erläutert: Aufgrund der hohen Rauigkeitswerte werden in Städten deutlich niedrigere Windgeschwindigkeiten erreicht als im Umland; dies wirkt sich natürlich aus auf die Be- und Entlüftung von Straßenschluchten und Häuserreihen, wo der größte Anteil an Abgasen produziert wird (20).

Wichtig für die Planung sind genaue Analysen der Windverhältnisse eines Stadtgebietes in Abhängigkeit von der Wetterlage und der Windgeschwindigkeit. Bei austauschschwacher Witterung überwiegt häufig eine langsame Nordostströmung, die wegen der Druckverteilung meist zusätzlich über eine tiefliegende Temperaturinversion verfügt (21). Die Planung sollte deshalb darauf achten, daß möglichst keine abgasemittierende Industrie im Nordostteil einer Stadt angesiedelt wird.

Bei Strahlungswetterlagen ist häufig zu beobachten, daß die bodennahen Strömungsverhältnisse von denen der darüberliegenden „freien“ Atmosphäre abgekoppelt sind. Der städtische Überwärmungseffekt sorgt dann dafür, daß ein stadteigenes Windsystem aufgebaut wird, bei dem die überwärmten versiegelten Flächen der „thermische“ Motor sind: Luft wird über dem Stadtgebiet zum Aufsteigen gezwungen; diese wird ersetzt durch nachströmende Umlandluft, die dem Stadtkörper Abkühlung bringt (22).

Die vorgenannten Faktoren sorgen in ihrer Gesamtheit für die Verteilung der Luftschadstoffe in einem Stadtgebiet. Anhand der in Dia 23 vorgestellten Analyse der Luftschadstoffverteilung in Bochum wird gezeigt, wie unterschiedlich hoch die Belastung in einzelnen Stadtteilen sein kann und in welchem Maße sie von den standörtlichen Gegebenheiten der Meßstationen abhängt.

In der Besprechung der abschließend aufgenommenen Klimafunktionskarte (24) wird am Beispiel der Stadt Lünen auf Ergebnisse von stadtklimatischen und lufthygienischen Untersuchungen eingegangen, die übersichtlich zeigen, von welchen Gegebenheiten bei zukünftigen Planungen ausgegangen werden muß.

Klimatische Unterschiede zwischen Stadt und Umland

Faktoren	Veränderungen gegenüber dem nicht bebauten Umland (= 100)
Strahlung	
Globalstrahlung auf horizontaler Oberfläche	80
Gegenstrahlung	110
Ultraviolett im Winter	30 (im Extremfall 0)
Ultraviolett im Sommer	70-90
Sonnenscheindauer	
Sichtbares Licht im Winter	92
Sichtbares Licht im Sommer	90
Niederschlag	
Gesamtbetrag	110
Tauabsatz	35
Lufttemperatur	
Jahresmittel	0,5- 1 Kelvin höher
Winterminima	1 - 3 Kelvin höher
maximale Temperaturunterschiede	3 - 10 Kelvin
Dauer der winterlichen Frostperiode	75
Verdunstung	
Gesamtbetrag	40-70
Relative Luftfeuchtigkeit	
Jahresmittel	94
Wintermittel	98
Sommermittel	92
Windgeschwindigkeit	
Jahresmittel	75
Spitzenböen	85
Windstillen	113
Vegetationsbedeckte Fläche	
Verlängerung der städtischen Vegetationsperiode	35-45 ca. 8-10 Tage

Dia 1

Klimatische Unterschiede zwischen Stadt und Umland

Die vorliegende Tabelle enthält eine Zusammenstellung ausgewählter Klimaelemente, für welche die in der Stadt ermittelten Werte in Prozenten der Freilandwerte (= 100) angegeben sind.

Für das Klimaelement **Strahlung** kann festgestellt werden, daß insbesondere im Winter der ultraviolette Anteil ($\lambda < 360 \text{ nm}$) stark vermindert sein kann; im Extremfall ist davon auszugehen, daß überhaupt kein UV-Licht in der Stadt zur Verfügung steht.

Die Globalstrahlung, worunter man die direkte und indirekte Sonnenstrahlung zusammenfaßt, ist in ihrer Intensität wegen der Dunstglocke etwas geringer als im Freiland, die langwellige Gegenstrahlung hingegen etwas erhöht.

Die **Sonnenscheindauer** ist aufgrund der Horizonteinengung und der in der städtischen Atmosphäre enthaltenen strahlungsabsorbierenden Stoffe verringert.

Die erhöhte mittlere **Niederschlagssumme** in der Stadt dürfte im wesentlichen auf ein häufigeres Auftreten konvektiver Regenfälle zurückzuführen sein. Konvektionsregen bildet sich bevorzugt über ausstrahlungsstarken, warmen Oberflächen, wie sie während heißer Sommertage in der Stadt vorherrschen.

Die Höhe des **Tauabsatzes** unterscheidet sich zum Umland deshalb so stark, weil der Taupunkt aufgrund der meist höheren Luft- und Oberflächentemperaturen, die in der Stadt herrschen, seltener erreicht wird; Tau kann sich deshalb nicht so schnell bilden.

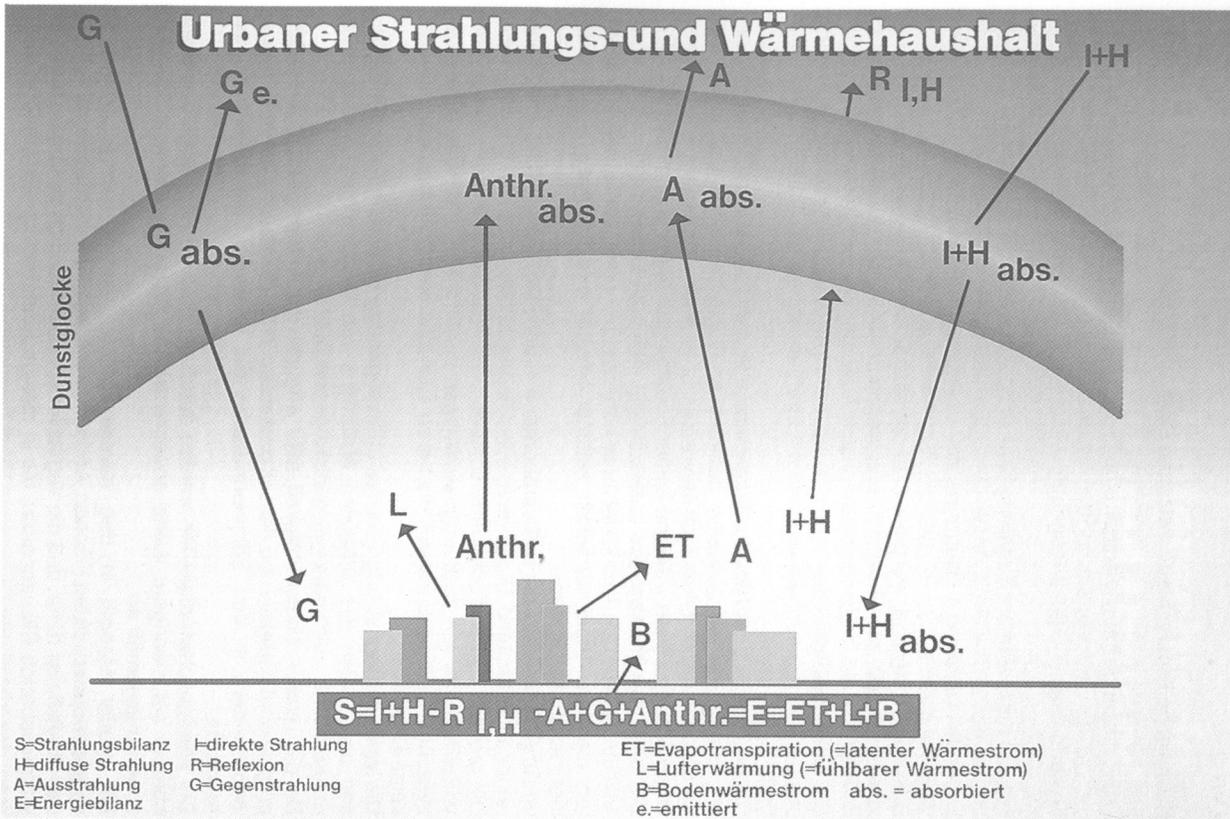
Im Jahresmittel sind die **Lufttemperaturen** in der Stadt nur um 0,5 bis 1,0 Kelvin höher als im Umland. Die Winterminima liegen im Mittel um 1 bis 3 Kelvin höher. Die größten Lufttemperaturunterschiede lassen sich des Nachts während des Vorherrschens von Strahlungswetterlagen beobachten; maximale Differenzen zwischen Stadt und Umland, die bis zu 10 Kelvin erreichen können, sind dann keine Seltenheit.

Die **Verdunstung** ist aufgrund des überwiegenden Fehlens geeigneter Vegetation und wegen des schnellen Abfließens von Niederschlagswasser durch unterirdische – und damit verdunstungsgeschützte – Kanäle sehr gering.

Da die **relative Luftfeuchtigkeit** sehr eng mit der Lufttemperatur umgekehrt proportional korreliert und die Lufttemperatur in Städten häufig höher ist, zeigen insbesondere in den Sommermonaten die relativen Luftfeuchten kleinere Ausmaße.

Die **Windgeschwindigkeiten** werden durch die größere Rauigkeit des Stadtkörpers auf niedrigere Werte abgebremst; die Anzahl der Windstillen steigt erwartungsgemäß an.

Ein großer Mangel in den meisten Städten ist ihr geringer Anteil an **vegetationsbedeckten** Flächen. Andererseits sorgen die thermischen Elemente des Stadtklimas dafür, daß die Vegetationsperiode deutlich verlängert wird und wärmeliebende Pflanzenarten, die in diesem Klimabereich sonst nicht vorkämen, das künstliche Ökosystem Stadt besiedeln können.



Dia 2

Urbaner Strahlungs- und Wärmehaushalt

Die das „künstliche Ökosystem“ Stadt versorgende Sonnenstrahlung wird – wie es der vorliegenden Abbildung zu entnehmen ist – in vielfältigster Weise verändert: durch die mit Abgasen und Aerosolen verschmutzte Luft, durch die (Boden-)Oberflächenvergrößerung und durch ein unterschiedlich thermisches Verhalten der Baukörper bei ihrer Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität.

Die einkommende kurzwellige direkte und diffuse Sonnenstrahlung ($I + H$) wird einerseits von den Gasen und Partikeln der Dunstglocke absorbiert ($I + H_{\text{abs.}}$) und reflektiert ($R_{I,H}$), andererseits bis zur Stadtoberfläche durchgelassen, wo sie ebenfalls absorbiert, also in Wärmestrahlung umgewandelt wird und auch an den Glas-, Beton- und Ziegelbauten mehr oder weniger stark reflektiert wird. Bei der langwelligen Ausstrahlung (A), die vom Stadtkörper als Wärmestrahlung emittiert wird, erfolgt in der Dunstschicht eine Absorption ($A_{\text{abs.}}$), wodurch sich die Schicht ebenfalls erwärmt und Energie abgibt.

Die durch die Sonnenstrahlung ($I + H$) in Gang gesetzten thermischen Prozesse sorgen über die Aufheizung der Baukörper für die Erwärmung der Luft (L) und für die Verdunstungsprozesse, sofern genügend Wasser vorhanden ist. Da durch die Verdunstung von Wasser Energie verbraucht wird und diese mit dem Aggregatwechsel des Wassers von der Flüssig- in die Gasphase in die Atmosphäre transportiert wird, nennt man diesen Vorgang auch latenten Wärmestrom (ET), im Gegensatz zum fühlbaren Wärmestrom (L).

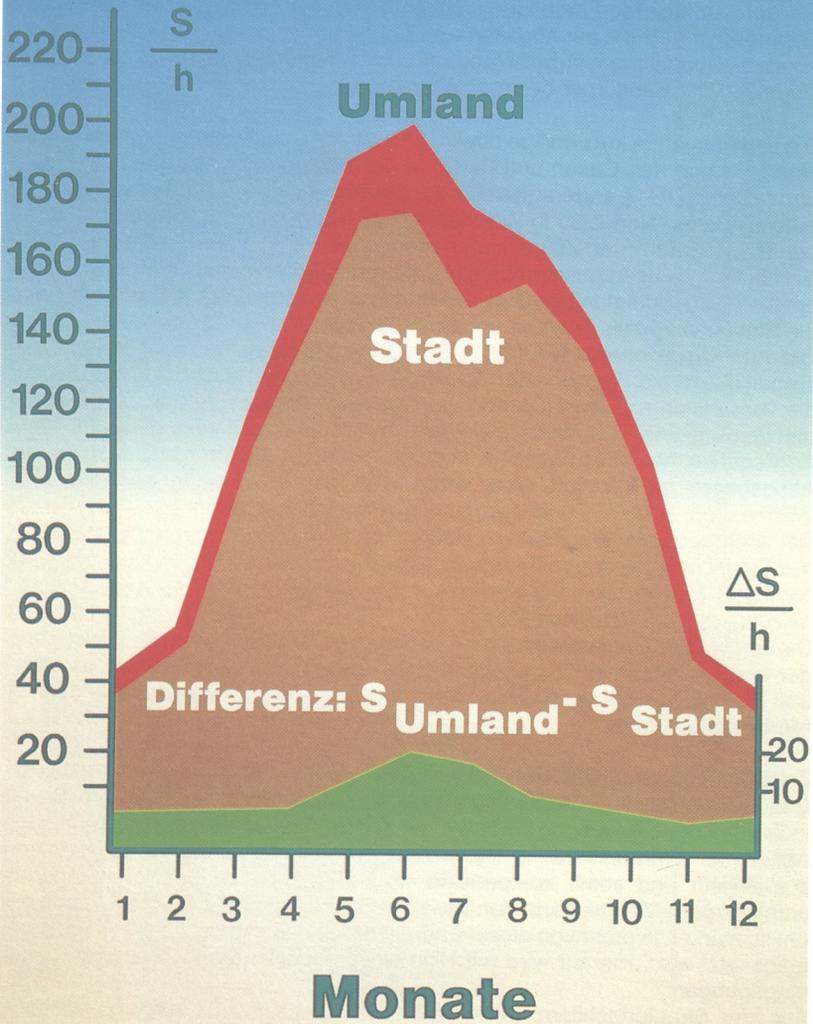
Der anthropogene Wärmestrom ($Anthr.$) wird verursacht durch alle Prozesse des Menschen, bei denen Energie zusätzlich zum natürlichen, durch die Sonne bedingten Wärmestrom frei wird: z.B. durch das Autofahren, die Wohnungsbeheizung, die Industrieproduktion.

Die langwellige Gegenstrahlung (G) ist diejenige Größe, die aus der Erwärmung der wasserdampfreichen, verschmutzten bodennahen Atmosphäre resultiert und Energie sowohl der Stadt als auch der über der Dunstglocke befindlichen Atmosphäre zuleitet.

Zusammenfassend läßt sich mit Hilfe der auf der Abbildung angegebenen Gleichung feststellen: Die Strahlungsbilanz wird bestimmt durch die direkte und indirekte Sonnenstrahlung ($I + H$), vermindert durch die Reflexion (R_{I+H}) und den Abfluß der Wärmestrahlung (A), wovon ein Teil durch die Gegenstrahlung zurückfließt und somit kompensiert wird. Die noch zu Buche schlagende anthropogene Wärme kann den Wert der Strahlungsbilanz erhöhen, und zwar um so stärker, je mehr von dieser Energie durch das menschliche Wirtschaften freigesetzt wird. Hierauf wird mit Hilfe eines anderen Diapositivs noch näher eingegangen.

Aus der Strahlungsbilanz (S) wird die Energiebilanz (E) versorgt; wichtige Energietransportgrößen sind der latente Wärmestrom (ET) und der fühlbare Wärmestrom (L), in geringerem Maße der Bodenwärmestrom (B).

Sonnenscheindauer (S) in Stunden (h) für eine Stadt- und Umlandstation



Dia 3

Sonnenscheindauer in Stadt und Umland

Die Anreicherung der verschiedenen Spurenstoffe in der Stadtatmosphäre mit ihren unterschiedlichen Absorptions-, Transmissions- und Reflexionseigenschaften gegenüber der einfallenden Sonnenstrahlung führt neben einer qualitativen Veränderung des Sonnenstrahlungsspektrums auch zu einer quantitativen Einbuße der Strahlungsintensität.

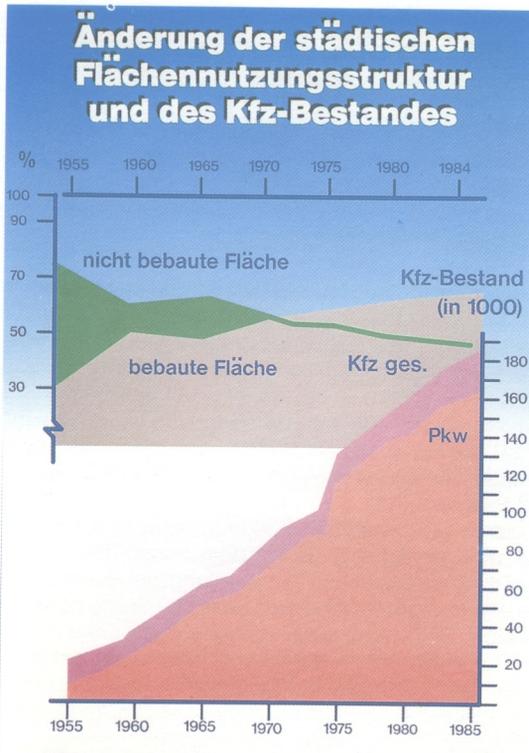
Die Abnahme der Beleuchtungsstärke läßt sich anhand eines Vergleichs der Sonnenscheindauer zwischen Stadt und Umland gut erkennen.

Nach den in der vorliegenden Abbildung enthaltenen Werten treten im Freiland während aller Monate durchschnittlich höhere Sonnenscheindauern auf als in der Stadt.

Die Beleuchtungsunterschiede sind im Sommer stärker ausgeprägt als im Winter: So tritt z.B. im Juni in der Stadt eine um 24 Stunden geringere absolute Sonnenscheindauer auf als im Umland. Im November beträgt der Unterschied hingegen nur 3 Stunden.

Aus den niedrigeren 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 und größere Horizonteinschränkung hervorgerufen wird. Verbunden mit einer Reduzierung der Beleuchtungsstärke läßt sich in Städten auch eine von der Wellenlänge abhängige Absorption der Sonnenstrahlung feststellen. 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%.

Allgemein kann davon ausgegangen werden, daß je nach Lage, Größe und Aufbau eines Stadtgebiets sowie unter Berücksichtigung des vorherrschenden Emissionstyps die Sonnenscheindauer zwischen 10% und 20% im Vergleich zum Umland reduziert ist.



Dia 4

Änderung der städtischen Flächennutzungsstruktur und des Kfz-Bestandes

Da die Oberflächen als Strahlungsreferenzflächen den städtischen Strahlungs- und Energiehaushalt beeinflussen, sorgt jede Veränderung in qualitativer und quantitativer Hinsicht für eine Beeinflussung der Reflexions-, Wärmeleitfähigkeits- und Wärmespeicherverhältnisse.

So kann insbesondere eine Zunahme der bebauten Fläche innerhalb eines Stadtgebietes nicht ohne Einfluß auf die genannten Parameter bleiben.

Am Beispiel der Stadt Bochum (Fläche: 145 km²) wurde für den Zeitraum von 1955 bis 1984 der prozentuale Anteil der bebauten und der nicht bebauten Fläche an der Gesamtfläche berechnet und auf vorliegender Abbildung dargestellt.

Das Diagramm zeigt, daß der Anteil der bebauten Fläche von rund 34% im Jahre 1955 auf 57% im Jahre 1984 zunahm, während die nicht bebaute Fläche entsprechend zurückging.

Aus der hiermit einhergehenden Veränderung – nämlich der Bodenverdichtung und -versiegelung, der Oberflächenvergrößerung und der Rauigkeitszunahme – resultiert für den urbanen Energiehaushalt eine Zunahme der Überwärmung im Vergleich zum Umland.

Auch der Straßenverkehr trägt – ungeachtet seiner Schadstoffemissionen, die er dem Ökosystem Stadt zuführt – zur anthropogenen Wärmeproduktion bei; insbesondere dann, wenn wie dem unteren Teil der Abbildung zu entnehmen ist, die Zahl der Kraftfahrzeuge in außerordentlich starkem Maße zugenommen hat. Das Diagramm enthält die Jahresdaten des Kfz-Bestands für den Zulassungsbereich Bochum, und zwar für den Zeitraum von 1955 bis 1985.

1985 betrug die Anzahl der Kraftfahrzeuge 180 764. Der eingezeichneten Verteilungskurve des Pkw-Bestands ist zu entnehmen, daß dieser immer einen sehr hohen Anteil am gesamten Kfz-Aufkommens besaß; im Jahre 1985 z.B. 88%.

Um die Größenordnung zu erfassen, in der Kfz-bedingte Abwärme produziert wird, ist für die in Bochum zugelassenen Kraftwagen beispielhaft folgende Überschlagsrechnung aufgestellt worden, wobei nachstehende Daten berücksichtigt sind:

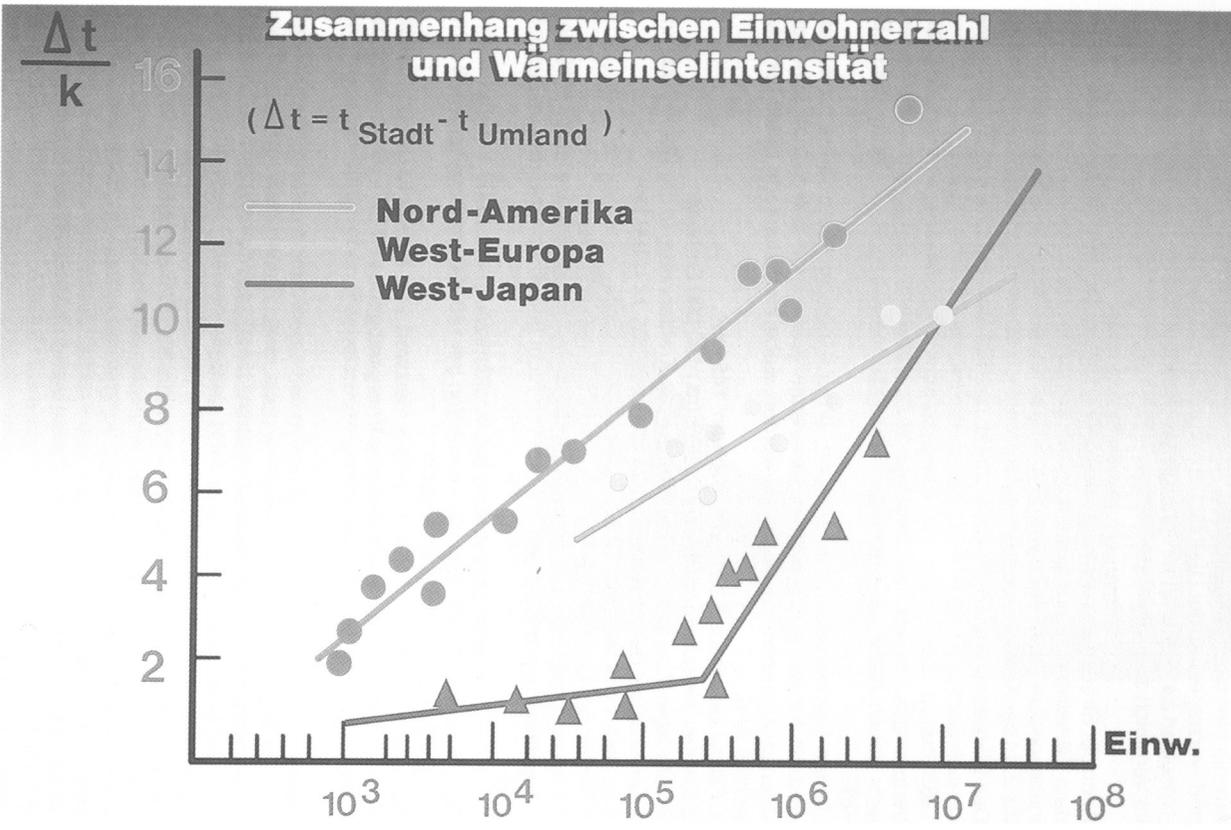
1. Fläche des Stadtgebiets von Bochum: 145 km²
2. Kraftfahrzeugbestand im Jahre 1985: (rd.) 180 000 Einheiten
3. Vorausgesetzte jährliche Fahrstrecke pro Kraftfahrzeug in der Stadt: 5 000 km
4. Geschätzter Benzinverbrauch im Stadtverkehr: 12 l/100 km
5. Heizwert des Benzins: 42 000 kJ/kp
6. Dichte des Benzins: 0,8 kp/l
7. Wirkungsgrad von Kraftfahrzeugmotoren $\eta = 10\%$; das bedeutet 90% des Benzinheizwertes werden in Form von nicht genutzter Abwärme freigesetzt.

Bei einer jährlichen Fahrstrecke pro Kraftfahrzeug von 5 000 km und einem Benzinverbrauch von 12 l/100 km werden bei 180 000 Kfz insgesamt 108×10^6 (= 108 000 000) l Benzin verbraucht.

Bei einer Dichte von 0,8 kp/l, einem Heizwert von 42 000 kJ/kp und einem Wirkungsgrad $\eta = 0,1$ ergibt sich eine Energieabgabe von $3,2 \times 10^{12}$ kJ durch die Fahrzeuge.

Bezieht man diese über einen Zeitraum von einem Jahr emittierte Abwärme auf die Stadtfläche von Bochum ($F = 145 \text{ km}^2$), dann erhält man, auf den Quadratcentimeter umgerechnet, in einem Jahr $2,2 \text{ kJ/cm}^2$ an Kfz-Abwärme, die der städtischen Atmosphäre zugeführt werden.

Da sich ohne einen Vergleich mit diesem Wert nicht viel anfangen läßt, wird er auf die mittlere Globalstrahlungssumme für Bochum bezogen, die 360 kJ/cm^2 im Jahr beträgt. Die Abwärme durch Kraftfahrzeuge beläuft sich hiernach nur auf rund $1/180$ (= 0,6%) der Globalstrahlungssumme. Das erscheint recht wenig, erhöht sich aber dann, wenn man die Kraftfahrzeugwärmeabgabe nur auf die Verkehrsfläche der Stadt bezieht. Da die Verkehrsfläche 20 km^2 beträgt, steigert sich die hierauf bezogene Wärmeabgabe auf $15,8 \text{ kJ/cm}^2 \cdot \text{a}$, mithin auf 4,4% der Globalstrahlungssumme!



Dia 5

Zusammenhang zwischen Einwohnerzahl und Wärmeinselintensität

Verschiedentlich hat man versucht, die Wärmeinselintensität (= die städtische Übertemperatur gegenüber der unbebauten Umlandfläche) in Abhängigkeit von den mannigfach einflußnehmenden Faktoren zu berechnen.

So konnten FUKUI (1968) und YOSHINO et al. (1973) nachweisen, daß die Bevölkerungszahl einer Stadt deutlich mit der Wärmeinselintensität korreliert. Das bedeutet jedoch nicht etwa, daß die städtische Übertemperatur nur auf die menschliche (Körper-)Wärmeabgabe zurückzuführen ist, sondern die Bevölkerungszahl fungiert als Indikator z.B. für höheren allgemeinen Energieverbrauch, dichtere Baustruktur und erhöhte Kfz-Bestände, sämtlich Erscheinungen, die von der Einwohnerzahl abhängen.

Die vorliegende Abbildung enthält Regressionsgeraden, die den o.g. Sachverhalt für nordamerikanische, westeuropäische und westjapanische Städte repräsentieren. Prinzipiell kann festgestellt werden, daß die Geraden recht gut die Abhängigkeit der Wärmeinselintensität von der Einwohnerzahl repräsentieren. Es fällt allerdings auf, daß der Verlauf und die Steigungsmaße zwischen den drei bzw. vier Geraden sehr unterschiedlich sind.

Ein Beispiel möge diesen Sachverhalt etwas näher erläutern:

In einer amerikanischen Millionenstadt können als Temperaturerhöhung gegenüber dem Umland etwa 12 K festgestellt werden, eine entsprechend bevölkerungsstarke europäische Stadt erreicht etwas mehr als 8 K und eine japanische Stadt hingegen nur etwa 5 K.

Diese deutlichen Unterschiede zeigen, daß bei der Abhängigkeit der Stadtüberwärmung von der Einwohnerzahl für die Stärke der Temperaturerhöhung nicht nur die Art der Gebäudekonstruktionen (Wolkenkratzer überwiegend in amerikanischen, weniger in westeuropäischen Städten) von Bedeutung ist, sondern auch die Straßenbreite, der Anteil an Grünflächen, das Energieverhaltensverhalten (in Nordamerika und Japan im Sommer verstärkte Nutzung von Klimaanlage), der Anteil an städtischen Wasserflächen sowie großräumig auch die Breitenlage eine Rolle spielen.

Auf eine Ausnahme für die japanischen Städte sei noch hingewiesen: bis zu einer Einwohnerzahl von etwa 400 000 läßt sich dort nur eine geringe Korrelation mit der Wärmeinselintensität nachweisen; die Gründe hierfür sind letztlich noch nicht bekannt; möglicherweise hängt dies mit der Tatsache zusammen, daß in japanischen Städten mit einer Einwohnerzahl von deutlich weniger als 1 Million sehr häufig Holz als Baumaterial verwendet wird und nicht Beton wie in Millionenstädten, der im Gegensatz zu Holz eine andere Wärmekapazität und -leitfähigkeit aufweist.

Anthropogene Wärmeproduktion städtisch bebauter Flächen

A = anthropogene Wärmeproduktion
Q = Strahlungsbilanz

Stadt	Fläche (km ²)	A (W/m ²)	Q (W/m ²)
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

Dia 6

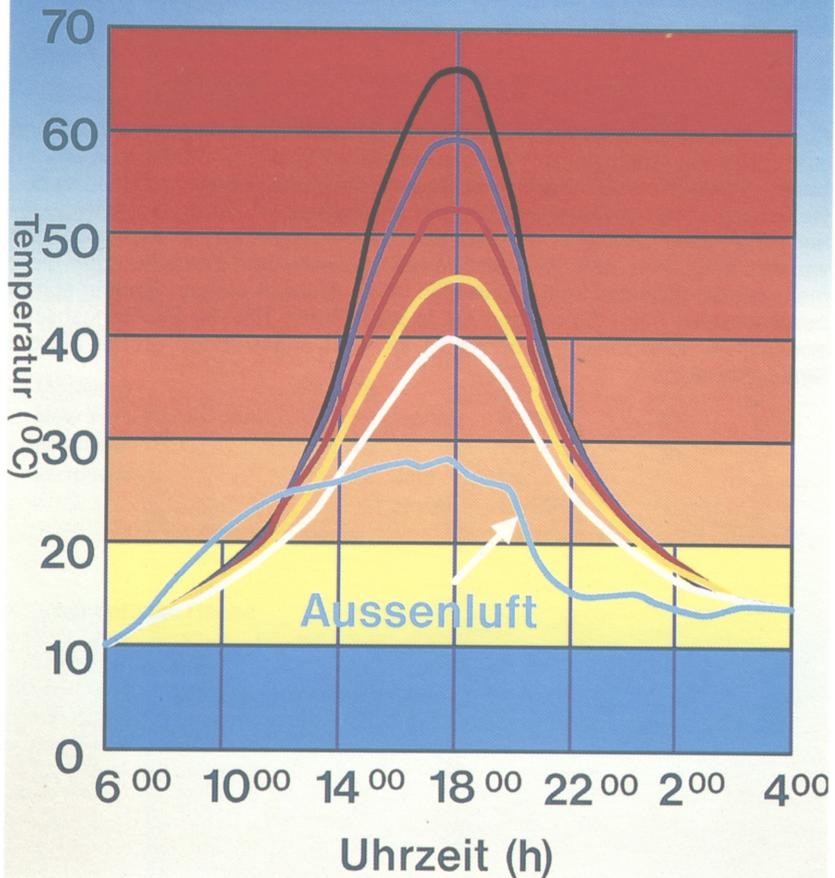
Anthropogene Wärmeproduktion städtisch bebauter Flächen

Unter den Begriff „anthropogene Wärmeproduktion“ subsumiert man den Energiefluß durch schlecht isolierte Hauswände – insbesondere in den heizungsintensiven Übergangsjahreszeiten und im Winter – Industrieanlagen und Kfz-Motoren, die Wärmeabgabe durch Hausbrand-, Industrie- und Autoabgase sowie die meist vernachlässigte Wärmeemission menschlicher und tierischer Körper. In diesem Zusammenhang sollte, obwohl dieser letztgenannte Faktor bei der anthropogenen Wärmeproduktion nicht die dominierende Rolle spielt, berücksichtigt werden, daß z.B. der Ruheumsatz eines etwa 1,80 m großen Mannes zwischen 80 und 90 Watt pro Quadratmeter Körperfläche, derjenige einer Frau bei etwa 70 W/m² liegt.

Bei arbeitenden und Sport treibenden Personen können Werte zwischen 300 und 800 W/m² erreicht werden, in Extremfällen noch weit mehr.

Für die eingangs genannten anthropogenen städtischen Wärmeproduktionen sind Zahlenangaben nur schwer zu ermitteln. Für einige Städte sind jedoch bereits Energieflußraten berechnet worden, die in der Tabelle enthalten sind. Gemessen an der mittleren Strahlungsbilanz, mit der die Werte der anthropogenen Wärmeproduktion in der tabellarischen Zusammenstellung verglichen wurden, zeigt sich, daß man letztere bei energetischen Betrachtungen 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.

Farbgebung und Oberflächentemperaturen städtischer Baumaterialien



Dia 7

Farbgebung und Oberflächentemperaturen städtischer Baumaterialien

Neben der Art des Baumaterials besitzt die Farbgebung eines Gebäudes durch die Reflexion sonnenexponierter Wand- und Dachflächen den größten Einfluß auf deren Oberflächentemperatur.

Die vorliegende Abbildung enthält Beispiele für verschieden gefärbte Wandflächen, die sich – je nach Farbtonwahl – unterschiedlich stark im Tagesverlauf aufheizen.

Bei einer maximalen Außenlufttemperatur von ca. 28 °C steigt z.B. die Oberflächentemperatur einer schwarz gestrichenen Westwand mit sonnenexponierten Wänden gegen 18 Uhr auf rund 65 °C an. Wesentlich niedrigere Werte werden auf in helleren Farbtönen gehaltenen Wänden erreicht: sie bewegen sich für weiß bzw. gelb gestrichene Wände zwischen 37 °C und 45 °C.

Die Maxima der Oberflächentemperaturen aller Wände sind – unabhängig von der Farbgebung – im Vergleich zum Maximum der Lufttemperatur um ca. 2 Stunden in den späteren Nachmittag bzw. frühen Abend verschoben. Die Ursache für das nachträgliche Erreichen der Temperaturmaxima der Materialien ist auf deren höhere Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zur Luft zurückzuführen.

Nach Sonnenuntergang ist die Wärmespeicherfähigkeit eines Baumaterials der limitierende Faktor für seine Oberflächentemperatur, so daß bei identisch konstruktivem Aufbau der hier verglichenen Wände bis zum Sonnenaufgang ein fast gleicher Verlauf der Temperaturkurven zu verzeichnen ist.

Das für 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 läßt sich durch die verstärkte kurzweilige Reflexion die Oberflächentemperatur bereits um ein Drittel senken. Hierdurch werden sowohl die relativ empfindliche Dachhaut als auch die gesamte Dachunterkonstruktion vor Hitze einwirkung wirksam geschützt.

Noch wesentlich wirkungsvoller lassen sich zur Überwärmung neigende Oberflächen an Bauwerken verhindern, wenn 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.



Dia 8

Infrarotaufnahme des Stadtgebietes von Recklinghausen (Tagaufnahme)

Freigegeben vom Reg. Präs. Münster, Nr. 10955/79

Die vorliegende Infrarotaufnahme wurde vom Flugzeug (Flughöhe etwa 5000 m) aus am 30.08.1979 zur Mittagszeit über dem Stadtgebiet von Recklinghausen aufgenommen.

Anhand der jedem Temperaturwert bzw. jeder Temperaturwertklasse zugeordneten Farbe lassen sich deutlich die kleinräumig auftretenden Unterschiede der Strahlungstemperaturen der verschiedenen Oberflächen erkennen.

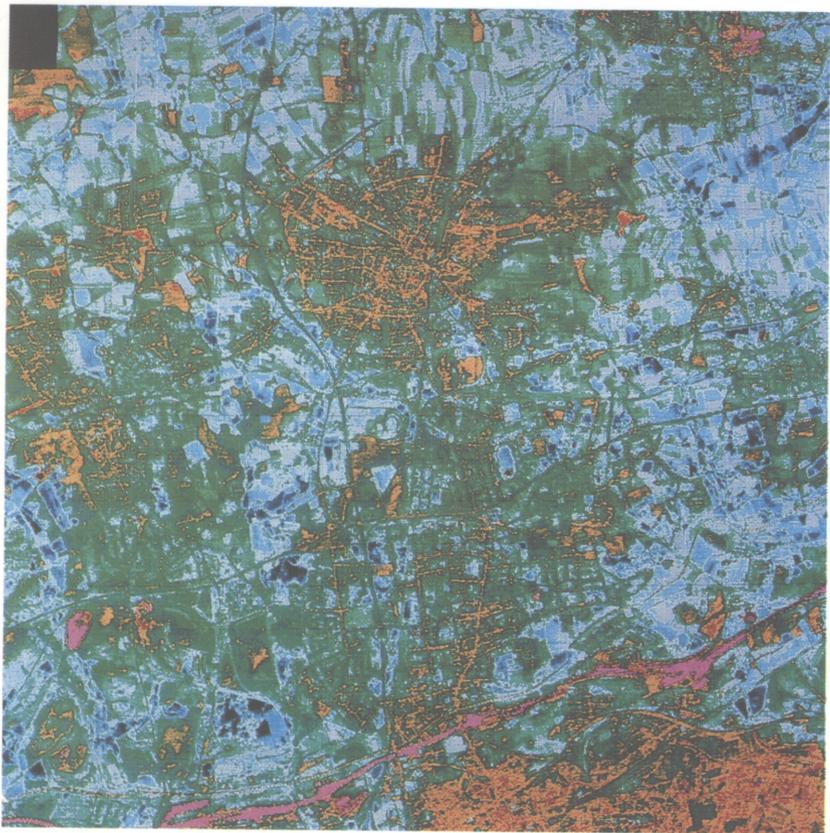
Der Vorteil einer solchen Aufnahme liegt darin, daß für ein relativ großes Gebiet die Oberflächenausstrahlungstemperaturen zum **gleichen** Zeitpunkt vorliegen. Die Temperaturspanne, die dieser Thermalaufnahme zu entnehmen ist, erstreckt sich von mehr als 27 °C (gelbe Farbe; hierbei handelt es sich überwiegend um versiegelte Flächen, wie Straßen, Plätze, Flachdächer) bis zu weniger als 17 °C (dunkelblaue Flächen; meist Wasser, wie der im Süden verlaufende Datteln-Hamm-Kanal).

Die bebauten Flächen, Straßen und Autobahnen (z.B. die westlich von Recklinghausen verlaufende A 43 Recklinghausen-Münster) weisen während dieser Strahlungswetterlage die höchsten Ausstrahlungstemperaturen auf; Wasserflächen, Grünanlagen und Äcker mit 19 °C bis 23 °C (hellblau bis blau) zeigen wesentlich niedrigere Temperaturen.

Relativ geschlossene Bauweisen (Innenstadtbereiche) sowie Gebäude mit großer wärmeabsorbierender Dachfläche sorgen für relativ hohe Strahlungstemperaturen.

Überwiegend aufgelockerte, durchlüftungsbegünstigte Bebauung mit einem relativ hohen, temperaturmindernden Anteil an Grünflächen führt zu weitgehend niedrigen Strahlungstemperaturen, die nur in einzelnen Straßenabschnitten höhere Werte erreichen. Recht deutlich zeigt sich dies am Bereich des Stadtparks (west-nordwestlich des Stadtzentrums) mit seinen Strahlungstemperaturen von weniger als 19 °C.

In der Innenstadt lassen sich einige meist westöstlich verlaufende Straßenzüge erkennen, die im Vergleich zu den angrenzenden Häuserkomplexen wesentlich kühler sind, d.h. viel niedrigere Strahlungstemperaturen aufweisen. Ursache hierfür sind relativ dichte Baumbestände als straßenbegleitendes Grün, die durch ihre Beschattung für einen kühleren Straßenraum sorgen.



Dia 9

Infrarotaufnahme des Stadtgebietes von Recklinghausen (Nachtaufnahme)

Freigegeben durch den Reg. Präs. Münster, Nr. 10955/79

Beherrschende Äquidensitenfarben auf der Infrarot-Aufnahme zum Nachtermin (31.08.1979, 4.00 Uhr, Flughöhe etwa 5.000 m ü. Grund) sind für das Umland der stadtkernnahen Bereiche von Recklinghausen im wesentlichen blau (Strahlungstemperaturen zwischen 7 °C und 11 °C) und grün (Strahlungstemperaturen zwischen 10 °C und 13 °C). Bei den blauen Flächen handelt es sich meist um landwirtschaftlich genutztes Gebiet mit z.T. ausgeprägten Bodensenken und Wiesenbewuchs, in denen sich die nachts entstehende Kaltluft sammeln kann. Hier werden Strahlungstemperaturen erreicht, die Werte von nur 5 °C aufweisen (überwiegend dunkelblau unterlegte Gebiete). Mit Annäherung an das Stadtzentrum gehen die Thermalbildfarben von blau über grün (Strahlungstemperaturen zwischen 11 ° und 13 °C) in orange und rot (Strahlungstemperaturen zwischen 13 °C und 15 °C) über.

Während tagsüber der Bereich des Stadtparks – west-nordwestlich des Stadtzentrums gelegen – als Insel niedrigerer Strahlungstemperaturen auffiel, hebt sich auf der Nachtaufnahme dieser Bereich durch höhere Strahlungstemperaturen (Werte zwischen 13 °C und 15 °C) aufgrund des engen Baumbestandes von der weniger dichten Bebauung ab.

Es läßt sich feststellen, daß in überwiegendem Maße Straßen und Plätze, großflächige Gebäude und dichte Bebauung zu relativ hohen Strahlungstemperaturen führen.

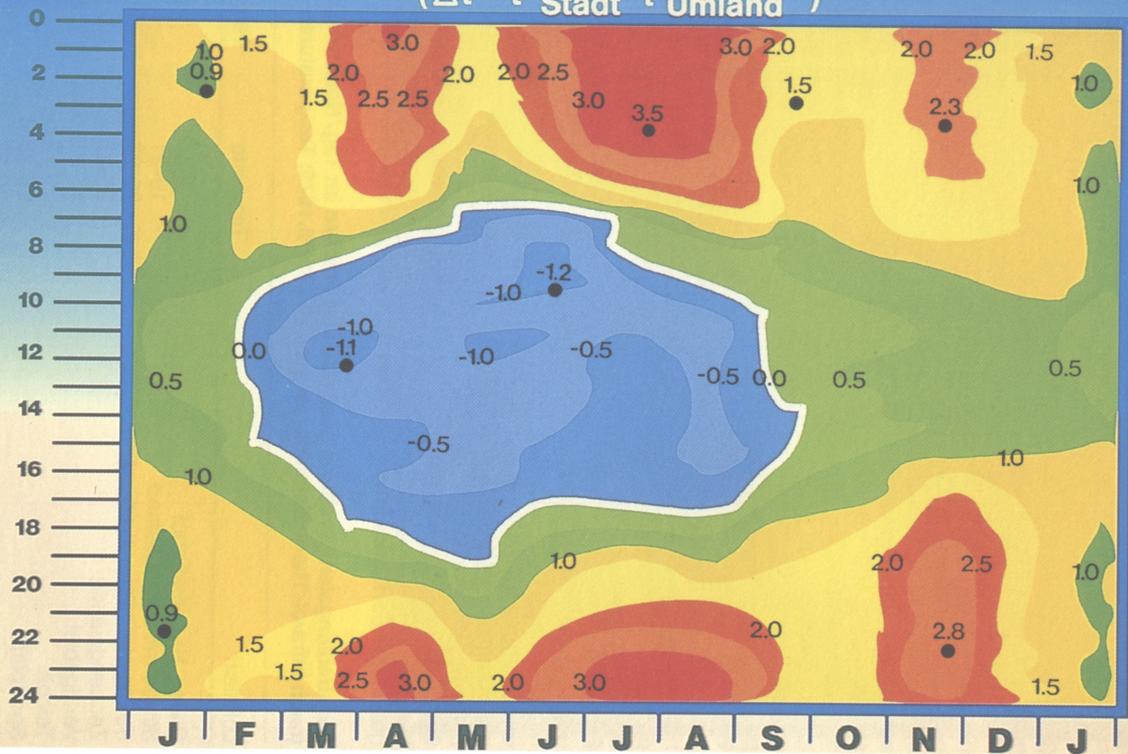
Gebiete geringerer Strahlungstemperaturen herrschen dort vor, wo einerseits ausstrahlungsstarke Wiesenflächen, andererseits aber auch aufgelockert bebaute Regionen mit Gartenanlagen auftreten.

Beispiele für die Unterschiede der Strahlungstemperaturen, wie sie sich beim Vergleich der Infrarotaufnahmen der Tag- und der Nachtsituation ergeben, zeigt nachfolgende Tabelle.

Ausstrahlungstemperaturen ausgewählter Flächen im Tag/Nachtvergleich (nach Infrarot-Thermalaufnahmen vom 30./31.08.1979; Temperaturen in °C)

Lokalität	Tagwerte	Nachtwerte
Gleise, Hauptbahnhof	> 27	8
Straße mit Baumbestand	19-21	13-15
Straße ohne Baumbestand	25-27	11-15
Zechengelände	25-27	11-13
Waldgebiet	17-21	13-15
Teiche	< 17	> 15
Sportplatz	23-25	7-9
Autobahn	25-27	11-13
Innenstadt (dicht bebaut)	> 27	11-15

Veränderung der täglichen und monatlichen Wärmeinselintensität ($\Delta t = t_{\text{Stadt}} - t_{\text{Umland}}$)



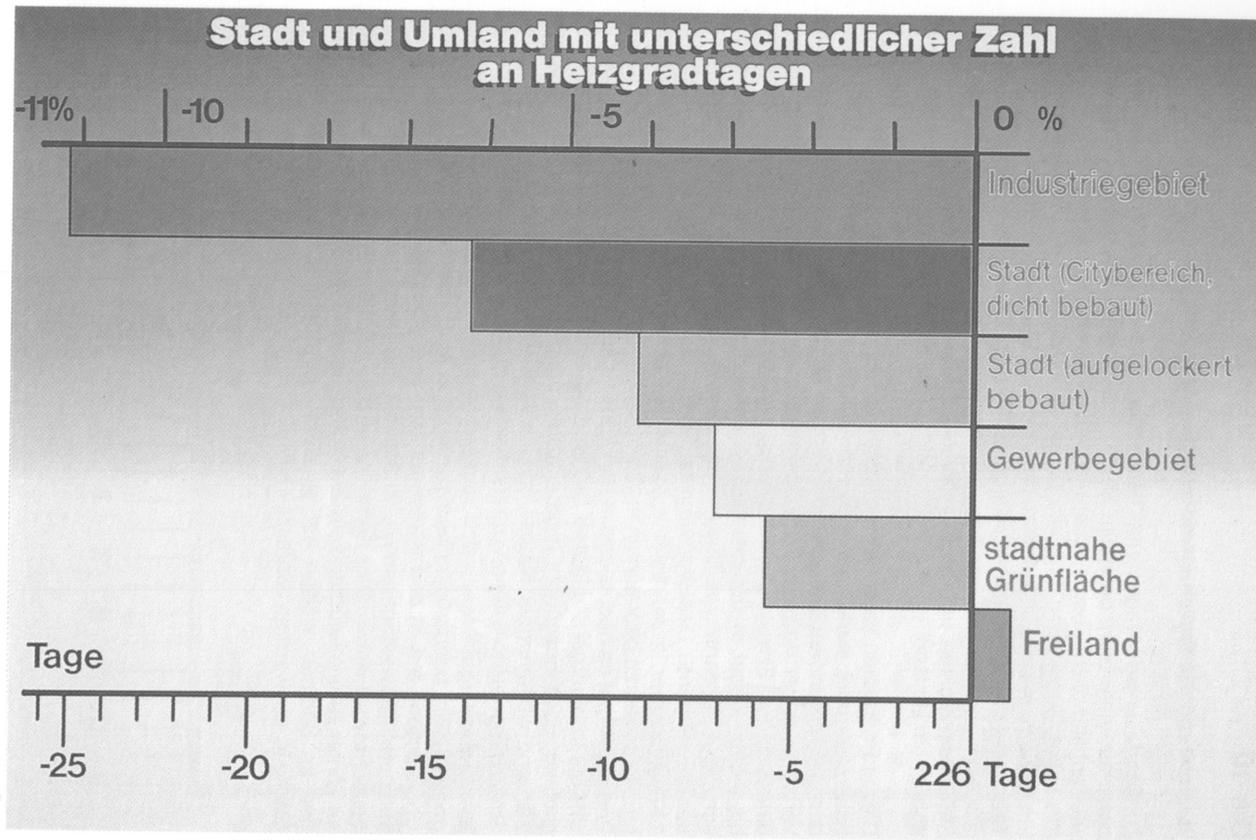
Dia 10

Veränderung der täglichen und monatlichen Wärmeinselintensität

Zur Darstellung der Tages- und Jahreszeitenunterschiede der Lufttemperaturen zwischen einer dicht bebauten Stadt- und einer nichtbebauten Umlandfläche wurden stündlich über ein Jahr ermittelte Meßwerte zweier Klimastationen miteinander verglichen. Die Differenzen, die zwischen der Lufttemperatur in der Stadt und dem Umland auftraten (t_{Stadt} minus t_{Umland}), wurden in Form eines Thermoisoplethendiagramms dargestellt. Anhand der gewählten Farbgebung läßt sich gut erkennen, daß tagsüber – etwa zwischen 7 und 18 Uhr – die Straßenschluchten um bis zu mehr als 1 Kelvin kühler sein können als das unbebaute Umland.

Dieses Phänomen kann damit erklärt werden, daß die zur Mittagszeit erhöhte Einstrahlung für starken konvektiven Austausch sorgt, wodurch Warmluft von den überhitzten Straßenflächen nach oben abgeführt wird. Daneben fördert die Verlagerung der Heizfläche ins Dachniveau und der Schattenwurf der Häuser eine geringere Erwärmung des städtischen Bereichs. In der Zeit von September bis Januar findet in der gleichen Tagesspanne zuerst eine allmähliche Abschwächung, dann eine Umkehr des thermischen Verhaltens statt (Änderung des Vorzeichens!). Das Straßenniveau ist jetzt gegenüber dem Umland um bis zu 1 Kelvin wärmer. Im Jahresmittel ist ein annähernder Ausgleich der Lufttemperaturdifferenzen zu beobachten.

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 im 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 einstrahlungsbedingte Überwärmung unserer Städte in der warmen Jahreszeit hin.



Dia 11

Stadt und Umland mit unterschiedlicher Zahl an Heizgradtagen

Ein Maß für die Notwendigkeit von Gebäudebeheizungen stellt der Begriff des sogenannten Heizgradtages dar. Ein Heizgradtag ist definitionsgemäß ein Tag, an dem der Mittelwert der Lufttemperatur kleiner ist als 12 °C. Wird ein solcher Wert unterschritten, muß eine Wohnung beheizt werden. Eine große Anzahl an Heizgradtagen, die ein Gebiet aufweist, bedeutet somit einen höheren Energieverbrauch zu Heizzwecken als eine geringere Anzahl.

Aufgrund der thermisch sehr unterschiedlichen Struktur einer Stadtfäche läßt sich in Abhängigkeit vom vorherrschenden Bebauungstyp (Freiland – dicht bebautes Innenstadtgebiet) auch eine unterschiedlich große Anzahl an Heizgradtagen berechnen.

Die vorliegende Abbildung enthält eine solche Auswertung, die verdeutlicht, daß die Anzahl der Heizgradtage innerhalb und in der Umgebung eines Stadtgebiets zwischen 201 Tagen und 226 Tagen pro Jahr schwanken kann.

In einem industriell genutzten Gebiet bzw. in dessen naher Umgebung braucht man nach der vorliegenden Definition rund 25 Tage pro Jahr weniger zu heizen als zum Beispiel im nicht bebauten Freiland.

Auch innerhalb eines Stadtgebiets läßt sich mit Hilfe der Anzahl an Heizgradtagen eine sinnvolle und vom Standpunkt des Energieverbrauchs wichtige Unterscheidung treffen.

Während im dichtbebauten Citybereich 14 Tage pro Jahr weniger geheizt werden muß als im Freiland, sorgt ein aufgelockert bebauter Stadtteil nur für eine Einsparung von 9 Heizgradtagen.

Auch in stadtnahen Grünflächen kann man noch in thermischer Hinsicht von den geringeren Windgeschwindigkeiten und von der städtischen Überwärmung profitieren. Dort nämlich beträgt die Ersparnis an Heizenergie immerhin noch 6 Tage im Vergleich zum Freiland.

Dia 12

Räumliches Erscheinungsbild städtischer Wärmeinseln

Das räumliche Erscheinungsbild einer städtischen Wärmeinsel läßt sich am besten anhand der Temperaturunterschiede zwischen bebauter und unbebauter Fläche nachzeichnen. Die Aufnahme der Lufttemperaturwerte geschieht sinnvollerweise mit Hilfe einer Meßfahrt, deren Route netzartig – mit möglichst vielen Meßpunkten versehen – über das Stadt- und Umlandgebiet gelegt wird. Eine solche Fahrt sollte während einer sommerlichen, windschwachen Strahlungswetterlage des Nachts durchgeführt werden, da zu diesem Zeitpunkt die Temperaturunterschiede am größten sind. Vielfach werden die Daten zu denen einer Bezugsstation oder zum berechneten Mittelwert in Form einer Isanomalienkarte¹ dargestellt.

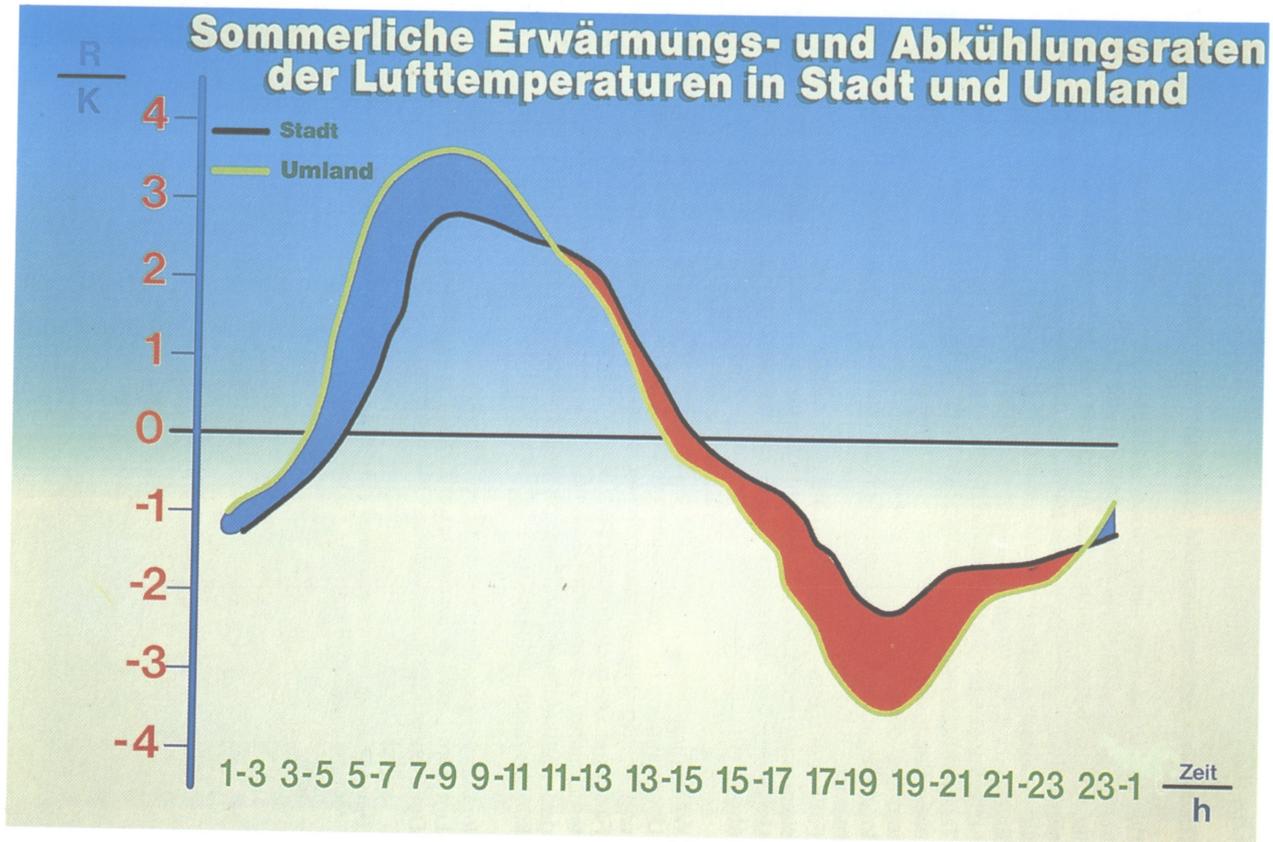
Im vorliegenden Beispiel erreichten die Temperaturunterschiede zum Mittelwert maximal 6 Kelvin.

Faßt man die 0-Kelvin-Isanomale als diejenige Begrenzungslinie auf, die die siedlungs- und baukörperbedingten Wärmeinseln der Stadtfläche vom kühleren Umland trennt, dann wird hiermit die bebauten von der unbebauten Fläche abgegrenzt.

Während innerstädtische Grünflächen und aufgelockerte Bebauung auf eine Überwärmung hemmend wirken, finden sich bei vorherrschend dichter Bebauung im allgemeinen die höchsten positiven Temperaturabweichungen (rote Farbtöne). Die größten negativen Abweichungen ergeben sich im nicht bebauten Umland, wo vor allem Geländemulden eine Kaltluftansammlung begünstigen (dunkelblaue Farbtöne). Veränderungen der Gestalt der Wärmeinseln können durch Kühlluftströme verursacht werden.

Im hier vorgestellten Fall fließt von Norden dem Geländegefälle folgend kühle Luft dem Lünener Stadtzentrum zu und sorgt dadurch für eine permanente Deformation der verschiedenen Wärmeinseln.

¹ Isanomalienkarte: Kartendarstellung, in der die Linien gleicher Differenzwerte zum berechneten Mittelwert enthalten sind.



Dia 13

Sommerliche Erwärmungs- und Abkühlungsraten der Lufttemperaturen in Stadt und Umland

Um feststellen zu können, inwieweit Lufttemperaturen in Abhängigkeit von der Baukörperstruktur einer zeitlichen Veränderung im Tagesverlauf unterliegen, wurden entsprechende Meßdaten repräsentativer Stadt- und Umlandstationen aus dem Großraum Bochum ausgewertet.

In der vorliegenden Abbildung sind auf der Abszisse die Tageszeit in Stunden, auf der Ordinate die Lufttemperaturveränderung in Kelvin pro Zeiteinheit dargestellt.

Um einen geglätteten Verlauf der „Stadt- und Umlandkurven“ in der Darstellung zu erreichen, wurden die Mittelwerte der Lufttemperaturveränderung über einen Zeitraum von zwei Stunden gemittelt.

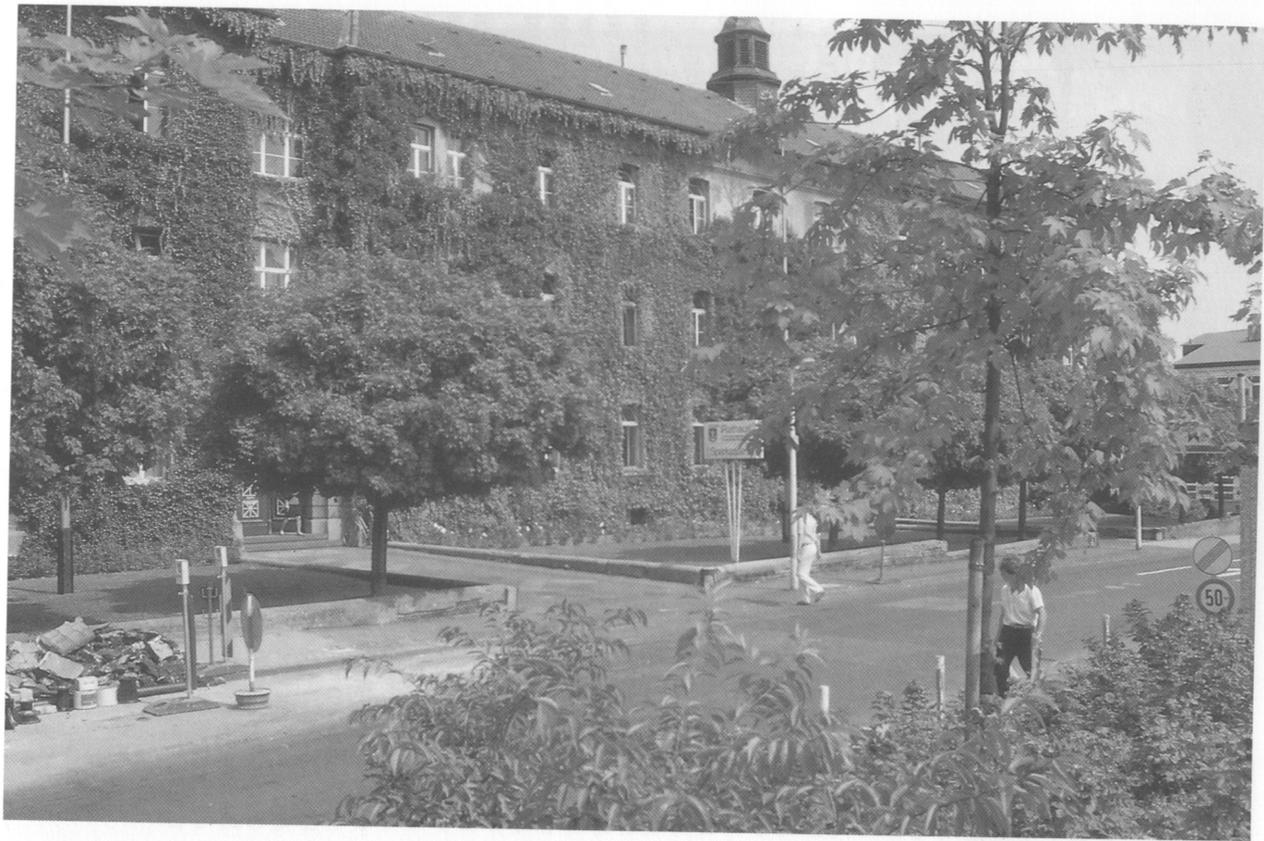
Die Veränderung der Werte in Abhängigkeit von der Zeit wird Erwärmungs- bzw. Abkühlungsrate genannt, worunter man eine positive bzw. negative Lufttemperaturveränderung versteht.

Daß die Erwärmungs- und Abkühlungsraten von den standörtlichen Voraussetzungen wie der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Materialien abhängen müssen, zeigt schon der Verlauf beider Kurven:

Die „Umlandkurve“ ist wesentlich stärker ausgeprägt als die „Stadtkurve“. Das hängt damit zusammen, daß die Erwärmung und die Abkühlung der Luft im Freiland viel schneller erfolgt als in der Stadt. Die Ursache dafür liegt in der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Freilandbodens, wodurch weniger Energie in den Untergrund abgeleitet, die Oberfläche deshalb stärker erwärmt wird und die Lufttemperatur höhere Werte annehmen kann als in der Stadt.

In der Stadt hingegen herrscht eine wesentlich geringere Lufterwärmungsrate vor, weil von der eingestrahnten Energie wegen der größeren Oberfläche des Stadtkörpers und der höheren Materialdichte mehr in die vorhandene Bausubstanz abgeleitet werden kann. Aus diesem Grunde steht hier für die Lufterwärmung weniger Energie zur Verfügung als im Freiland, was sich an den träger ansteigenden Erwärmungsraten zeigt.

In den Abend- und Nachtstunden kehrt sich dieses Verhältnis jedoch um: Die Abkühlungsrate der städtischen Luft sackt wesentlich weniger tief ab als die des Umlands. Der Grund hierfür ist in der Wärmespeicherfähigkeit der städtischen Baukörper zu sehen, die – nachdem sie tagsüber genügend Strahlung empfangen haben – auch des nachts durch die Wärmeabgabe die Lufttemperatur nicht so weit absinken lassen, wie es vergleichsweise im Freiland der Fall ist.



Dia 14

Veränderung der mikroklimatischen Verhältnisse durch Hausbegrünung

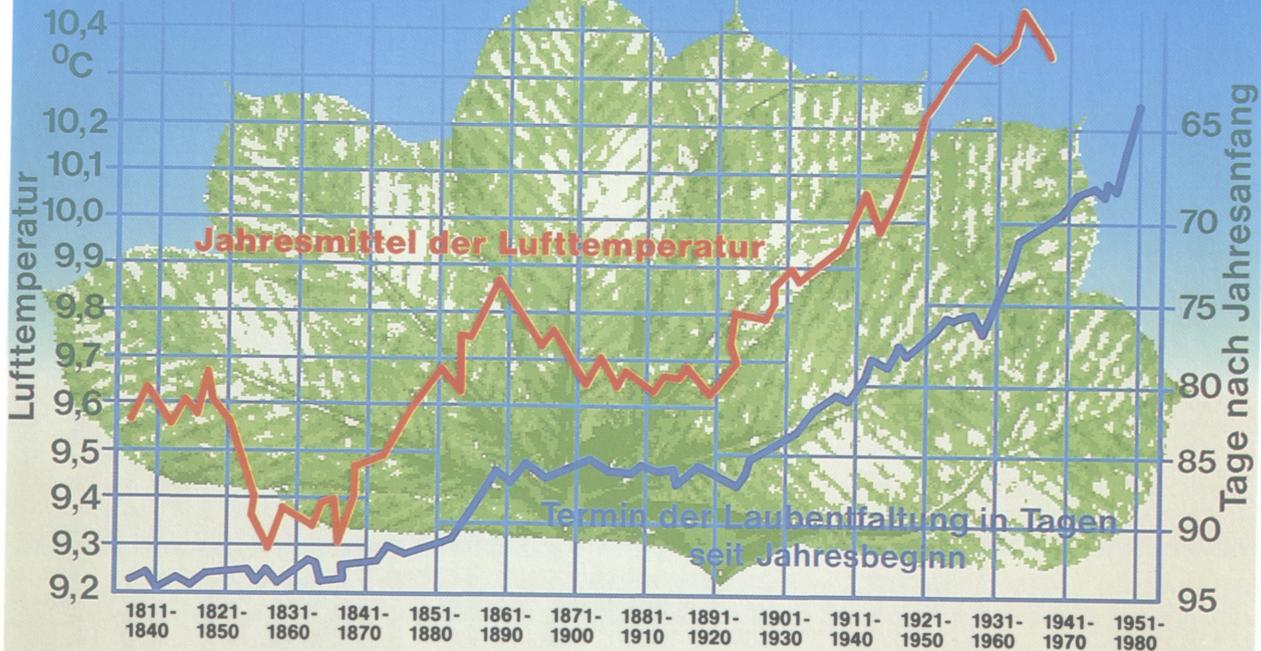
Sehr wirkungsvoll lassen sich zur Überwärmung neigende Oberflächen an Bauwerken verhindern, wenn Dach- und/oder Fassadenbegrünungen mit immer- oder sommergrünen Kletterpflanzen vorgenommen werden, die in außerordentlich mannigfaltiger Weise positiv auf das bauwerksnahe Mikro- und Mesoklima einzuwirken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

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

- Absenkung 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.
- Reduzierung von Luftverunreinigungen in Hausnähe durch Erhöhung der schadstoffspezifischen Ablagerungsgeschwindigkeiten partikel- und gasförmiger Spurenstoffe. 1 m² eines mit Gras bepflanzten Daches kann z.B. etwa 0,5 kg Luftschadstoffe pro Jahr binden.
- 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 12-18% der langjährigen Jahresniederschlagssumme von Bochum).

Insgesamt gesehen kann man davon ausgehen, daß die 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 100 mal 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 und Fassaden bieten, müßte allerdings sichergestellt werden, daß Klagen über ihre Undichtigkeit der Vergangenheit angehören.

Zusammenhang zwischen mittlerer Lufttemperatur und städtischer Vegetationsentwicklung



Dia 15

Zusammenhang zwischen mittlerer Lufttemperatur und städtischer Vegetationsentwicklung

Neben der Zufuhr von essentiellen Nährstoffen und Wasser spielt auch das Lufttemperaturniveau eine Rolle für das Gedeihen der Pflanzen.

Wie sehr letzteres auf das Eintreten phänologischer Phasen Einfluß nimmt, zeigt der in vorliegender Abbildung dargestellte Zusammenhang zwischen der mittleren Lufttemperatur und der Laubblattentfaltung einer Kastanie in der Stadt Genf.

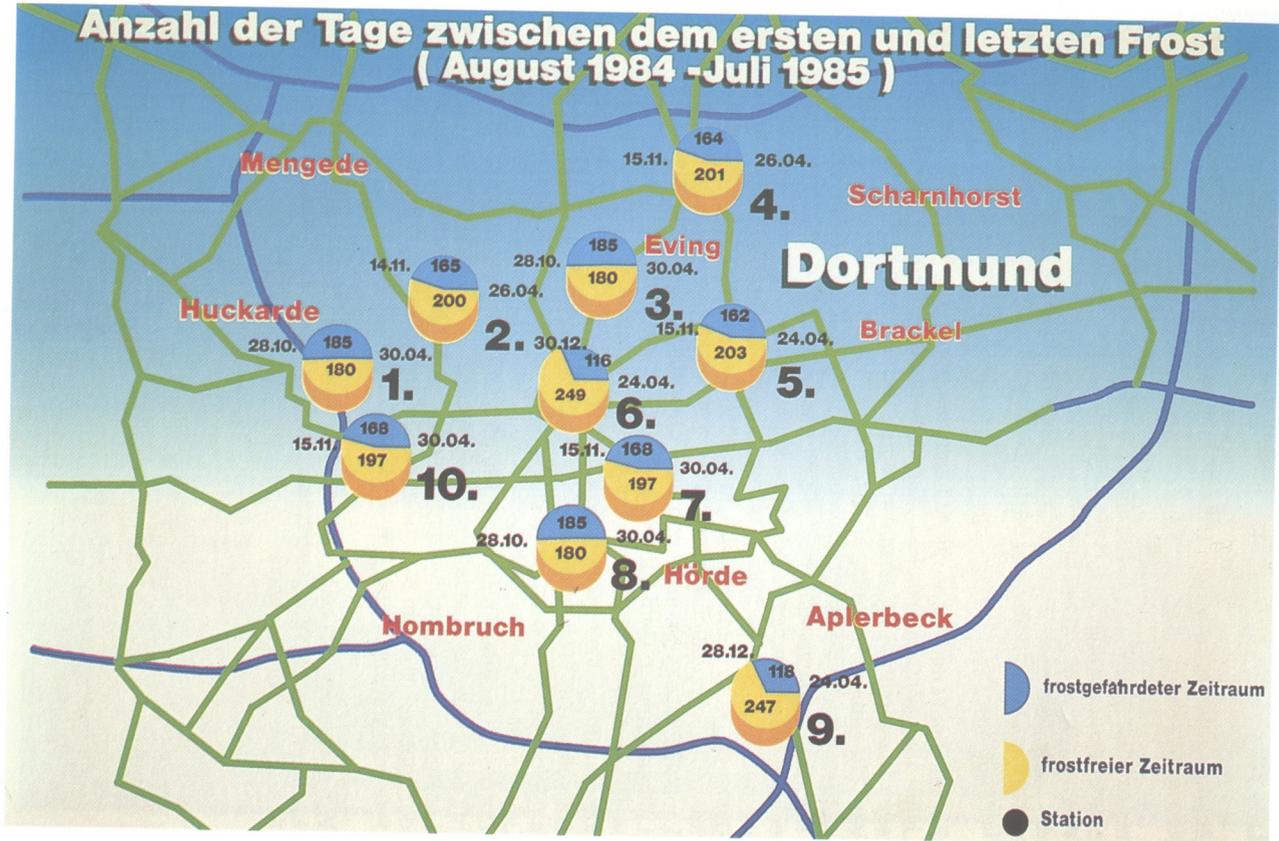
Für die Stadt Genf liegen die Jahresmittelwerte der Lufttemperaturen seit dem Jahre 1808 vor. Vom gleichen Jahr an wurden die Termine der Laubentfaltung einer bestimmten Roßkastanie in Tagen nach Jahresanfang notiert.

Wie die Abbildung zeigt, in der jeweils 30jährige Mittelwerte eingetragen wurden, hat sich die Laubblattentfaltung der beobachteten Roßkastanie vom 95. Tag nach Jahresanfang (= 5. April) im Jahre 1808/37 – unterbrochen von einigen Schwankungen – bis 1951/80 auf den 64. Tag nach Jahresanfang (das ist der 5. März) verfrüht. Da die Laubblattentfaltung temperaturabhängig gesteuert wird, müssen sich in dieser Zeit auch die Lufttemperaturwerte kontinuierlich geändert haben. Dies trifft tatsächlich zu, wie der Verlauf der Laubblattentfaltungskurve und die Entwicklung der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur in Genf auf vorstehender Abbildung zeigen. Die beiden Kurven weisen eine hohe Übereinstimmung auf. Nach anfänglich größeren Schwankungen der Lufttemperatur zwischen 9,6 °C, 9,3 °C (1831/60) und 9,8 °C (zwischen 1851/80 und 1861/90) zeigt diese bis 1964 einen relativ stark ansteigenden Trend an, der bei Beendigung der Lufttemperaturerfassung im Jahre 1964 10,4 °C erreicht.

Die große Übereinstimmung der Temperaturwerte – insbesondere ab 1867/96 – mit der der Laubblattentfaltung ist auch deshalb erstaunlich, weil es sich bei den Lufttemperaturwerten um Jahresmittelwerte handelt, während „die Eintrittsdaten der Laubentfaltung im wesentlichen von der Temperatur des vorhergehenden Frühlings abhängen“ (KEIL & SCHNELLE, 1981, S. 180).

Wie dieses Beispiel zeigt, lassen sich Pflanzen bei genügend langer Dauer der Meß- und Beobachtungsperiode für den Nachweis von Klimaänderungen auch in der Stadt heranziehen.

Anzahl der Tage zwischen dem ersten und letzten Frost (August 1984 -Juli 1985)



Dia 16

Auftreten des ersten und letzten Frostes innerhalb eines Stadtgebietes

Wie unterschiedlich die thermischen Verhältnisse innerhalb eines Stadtgebietes sein können, zeigt sich auch an den zeitlich z.T. sehr weit auseinander liegenden Eintrittsdaten des ersten und letzten Frostes. Das vorliegende Beispiel gibt eine Auswertung, die mit Hilfe von 10 Meßstationen im Stadtgebiet von Dortmund für den Zeitraum von August 1984 bis Juli 1985 durchgeführt wurde.

An den Stationen in Grünanlagen oder in deren Nähe sowie in unbebauten Gebieten ließ sich erster Frost am 28.10 beobachten.

In Lagen, die stadtnah, randstädtisch aufgelockert bebaut sind, sanken aufgrund der Flächenversiegelung die Lufttemperaturen nicht so schnell unter null Grad Celsius ab, so daß hier Frost erst am 14. bzw. 15.11., mithin zweieinhalb Wochen später, beobachtet werden konnte.

Im Wald und in der Innenstadt wurden die ersten Lufttemperaturen, die auf Werte von unter null Grad Celsius abfielen, nicht vor dem 28. bzw. 30.12., also rund 2 Monate später als an den Freilandstationen, erreicht. Im Freiland waren bis zu diesem Zeitpunkt schon zwischen 21 und 23 Frosttage aufgetreten (Definition eines Frosttages: Minimum der Lufttemperatur eines Tages liegt unter null Grad Celsius).

Letzter Frost wurde in den einzelnen Stadtteilen zwischen dem 24. und 30.4. beobachtet.

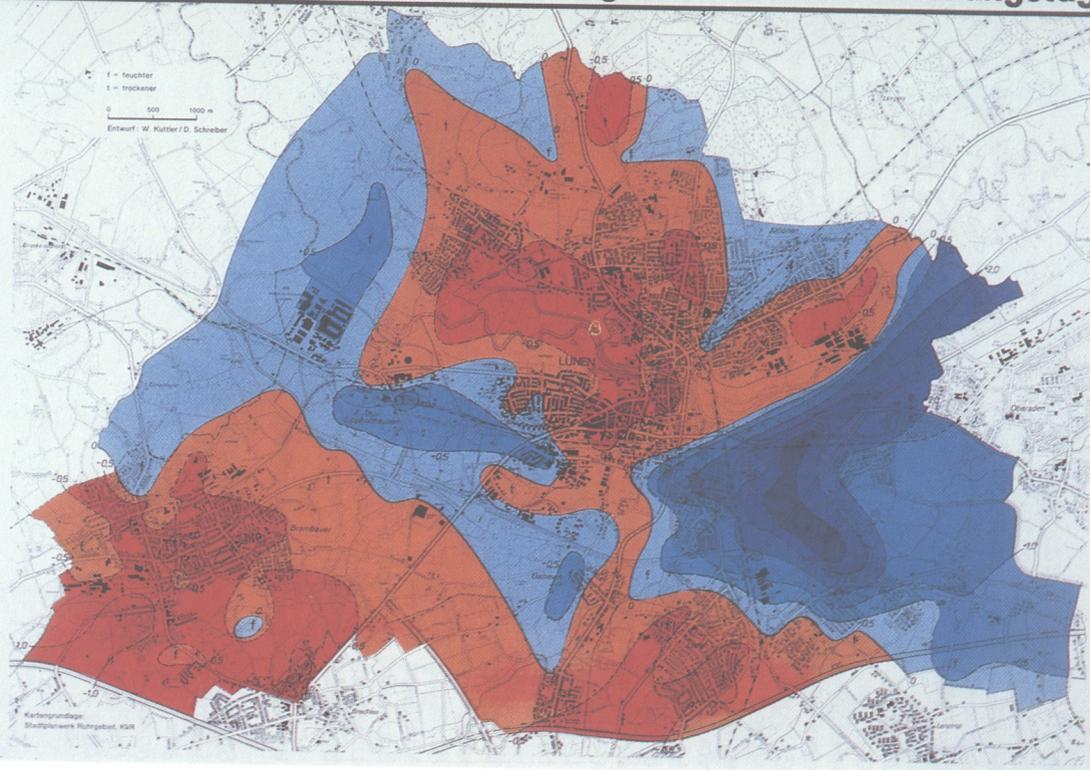
Vergleicht man einmal die Zeitspanne zwischen dem Auftreten des ersten und letzten Frostes für die einzelnen Standorte, so ergeben sich folgende Werte:

An nicht bebauten, meist grünlandbestimmten Standorten betrug die Zeitspanne 184 Tage, an denen eventuell mit Frost gerechnet werden mußte; im dicht bebauten, versiegelten Stadtgebiet nur an 115 Tagen – ein beträchtlicher Unterschied, wenn man bedenkt, daß die einzelnen Stationsstandorte im Stadtgebiet nur wenig weit auseinanderliegen.

Verzeichnis der Stationsstandorte

Station 1 (*Grün-/Freifläche*); Station 2 (*Industriegebiet, aufgelockert bebaut*); Station 3 (*randstädtisch, aufgelockert bebaut*); Station 4 (*randstädtisch, aufgelockert bebaut*); Station 5 (*Industriegebiet, Bundesbahnbetriebswerk*); Station 6 (*Innenstadt*); Station 7 (*randstädtisch, aufgelockert bebaut*); Station 8 (*Grün-/Freifläche*); Station 9 (*Grünfläche, im Waldbestand*); Station 10 (*Grün-/Freifläche*).

Urbane Verteilung der Luftfeuchtigkeit an einem Strahlungstag



Dia 17

Urbane Verteilung der Luftfeuchtigkeit an einem Strahlungstag

Die vorliegende Abbildung zeigt die Verteilung der absoluten Luftfeuchtigkeit (in g Wasser pro m^3 Luft) für die Stadtgebietsfläche von Lünen während eines Strahlungswettertages. Der hier dargestellten Verteilungskarte liegt eine Meßfahrt vom 31. August 1981 (14:00 MEZ) zugrunde, bei der an 266 Meßpunkten im Stadtgebiet die Luftfeuchtigkeit gemessen wurde.

Aus diesen 266 Einzelwerten wurde für die Meßfahrt ein Durchschnittwert berechnet, der sich auf $10,08 \text{ g/m}^3$ belief.

Die Karte zeigt jeweils im Abstand von $0,5 \text{ g/m}^3$ die positiven und negativen Abweichungen zu diesem Wert als Isolinien.

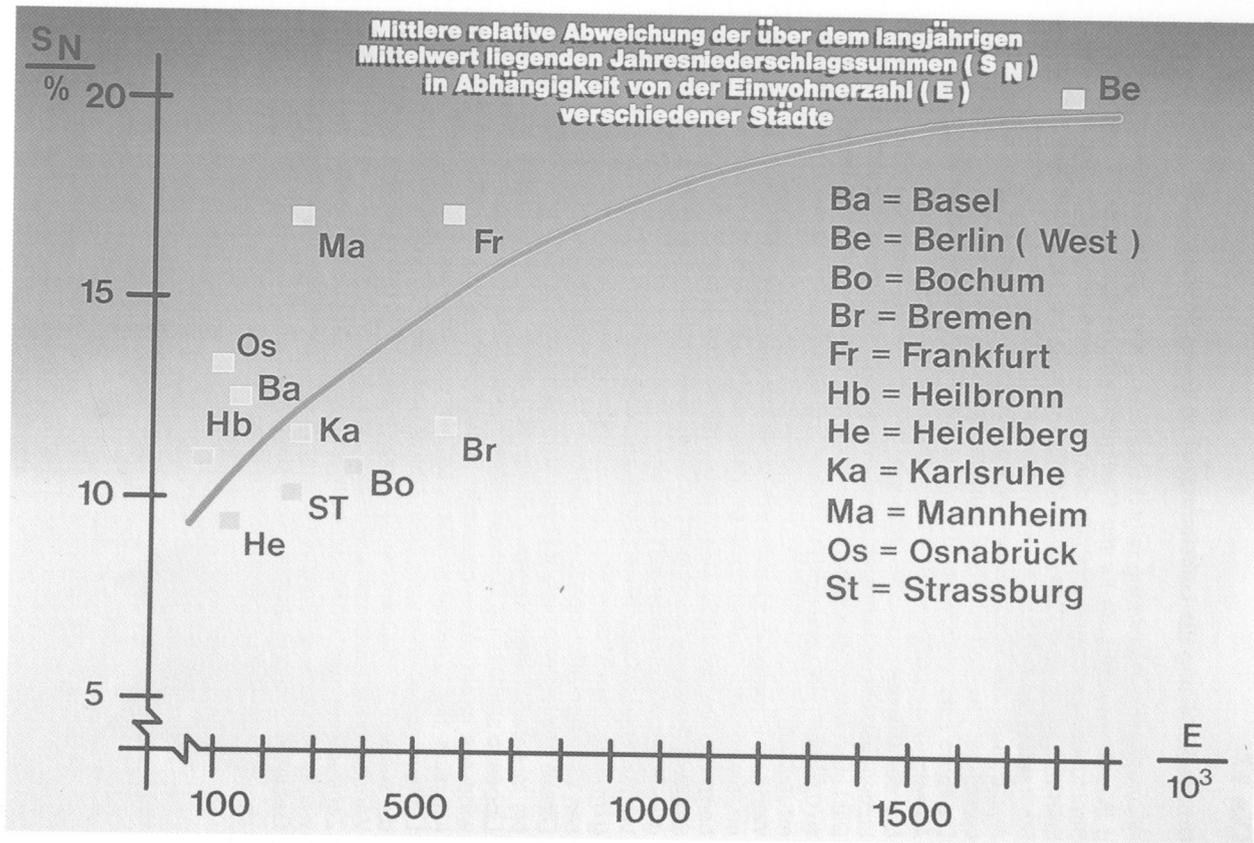
Mit der 0 g/m^3 - Isolinie wird der Bereich einer größeren bzw. kleineren Luftfeuchtigkeit im Vergleich zum oben genannten Mittelwert getrennt.

Die Linie umfährt den bebauten Bereich in Nord- und Altlünen, der eine um bis zu $0,5 \text{ g/m}^3$ geringere Luftfeuchtigkeit aufweist als die Gebiete jenseits der 0 g/m^3 -Isolinie.

Während in Lünen-Süd relativ trockene Gebiete mit einer z.T. um mehr als $0,5 \text{ g/m}^3$ niedrigeren Luftfeuchtigkeit ebenfalls über bebauter Fläche auftraten, herrschte im westlich gelegenen Ortsteil Brambauer über der gesamten Stadtteilfläche eine geringere Luftfeuchtigkeit vor, die mit bis zu $1,0 \text{ g/m}^3$ unter dem berechneten Mittelwert lag.

Vergleichsweise sehr hohe Luftfeuchtheitswerte, die zum Teil mit mehr als $3,5 \text{ g/m}^3$ über dem Mittelwert lagen, besaßen Luftmassen im Ortsteil Beckinghausen zwischen der Lippeaue und dem Datteln-Hamm-Kanal.

Dieses relativ große Gebiet erstreckte sich mit abnehmender absoluter Feuchte bis in den Stadtteil Horstmar (Südosten). Es dürfte sich hierbei um aus der Lippeaue stammende Luftfeuchtigkeit handeln, die durch einen leichten Nordwind aus ihrem Ursprungsgebiet verlagert wurde. Im Stadtteil Lippolthausen (westlich des Zentrums) läßt sich ein weiteres Gebiet gering überhöhter Luftfeuchtigkeit erkennen; auch hierbei dürfte es sich um Feuchtigkeit handeln, die aus dem Auengebiet der Lippe durch schwache nördliche bzw. nordöstliche Winde hierher transportiert wurden. Darauf deutet auch schon der westlich des Zentrums in der Lippeaue gelegene relativ trockene Bereich hin, dessen weniger feuchte Luftmassen aufgrund der Nordströmung aus den bebauten Gebieten heraus in dieses Gebiet gelangten.



Dia 18

Urbane Niederschlagsmodifikation

Städte beeinflussen durch Erhöhung der Bodenrauigkeit, Überhitzung des Untergrundes und hohes Kondensationskernpotential in unterschiedlicher Art und Weise den Niederschlag. Insbesondere sollen Städte in Abhängigkeit von ihrer Größe dazu beitragen, daß sich vermehrt Konvektionsregenereignisse einstellen und diese auch noch wesentlich stärker in Erscheinung treten.

Um zu prüfen, ob ein solcher Zusammenhang besteht, wurden die mittleren relativen Abweichungen der über den langjährigen Mittelwerten liegenden Jahresniederschlagssummen in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl verschiedener Städte in vorliegender Abbildung dargestellt.

Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, bewegen sich die angegebenen Werte zwischen 9,6% für Heidelberg und 20,1% für Berlin. Das bedeutet, daß die mittleren maximalen Niederschlagsmengen in dem 130 000 Einwohner zählenden Heidelberg um 9,6% über den langjährigen Durchschnittswerten liegen, in Berlin mit seinen 1,9 Mio. Einwohnern hingegen um 20,1%.

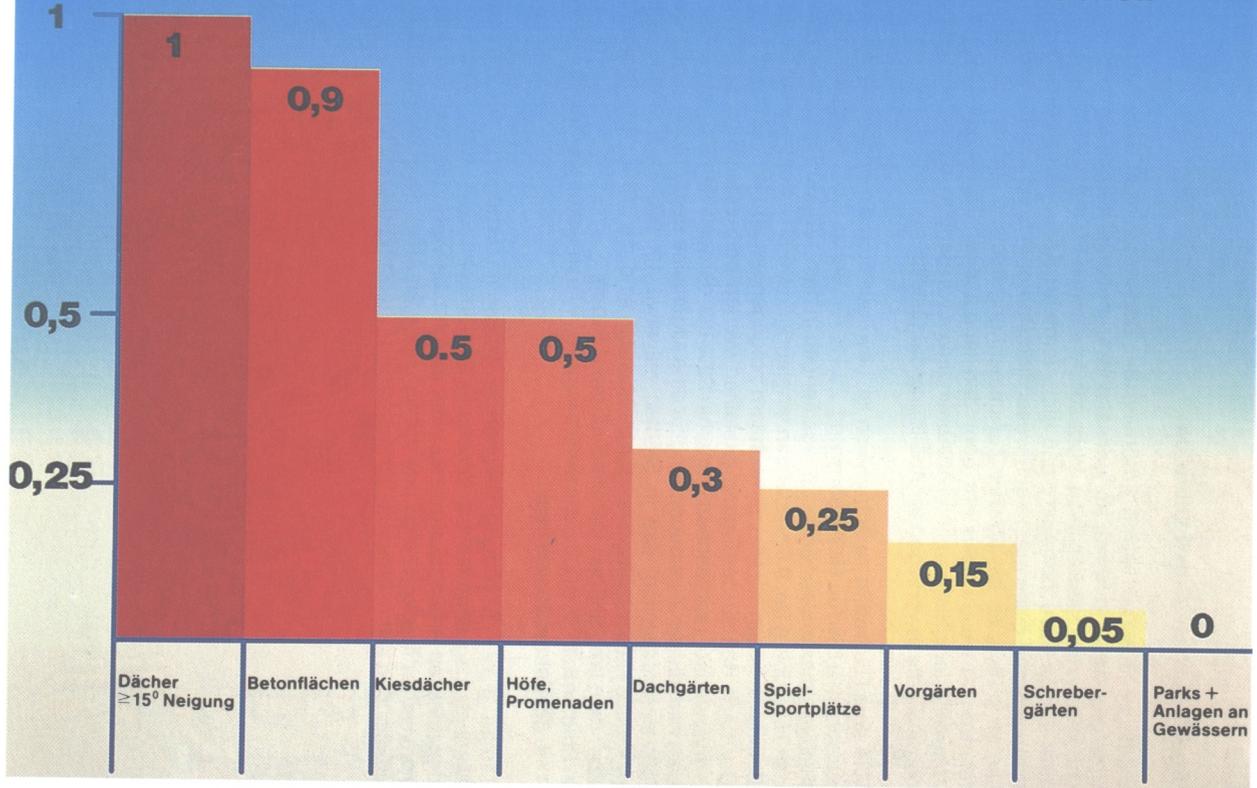
Der nach den zur Verfügung gestellten Werten berechnete und gezeichnete Kurvenverlauf repräsentiert immerhin 62% der dargestellten Einzelfälle.

Legt man diesen Zusammenhang für eine allgemeine Betrachtung zugrunde, so läßt sich feststellen, daß in Städten mit etwa 100 000 Einwohnern mittlere maximale Niederschlagsmengen zu erwarten sind, die in ihrer Ergiebigkeit 10% über dem langjährigen Durchschnittswert liegen.

In Städten mit 1 000 000 Einwohnern kann ein Wert erwartet werden, der bei rund 17% der Jahressumme liegt.

Die in dieser Abbildung dargestellte langsame Erhöhung der maximalen Niederschlagssummen bei zunehmender Einwohnerzahl wird allgemein auf den höheren Versiegelungsgrad, einer dadurch hervorgerufenen Begünstigung konvektiver Niederschläge und auf den höheren Anteil an Staubteilchen in der städtischen Atmosphäre im Vergleich zum Umland zurückgeführt.

Abfluss- und Verdunstungsverhalten städtischer Oberflächen



Dia 19

Abfluß- und Verdunstungsverhalten städtischer Oberflächen

Die Vegetationsarmut der Städte, die weitgehende Versiegelung ihrer Oberflächen und der rasche Abfluß des gefallen 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.

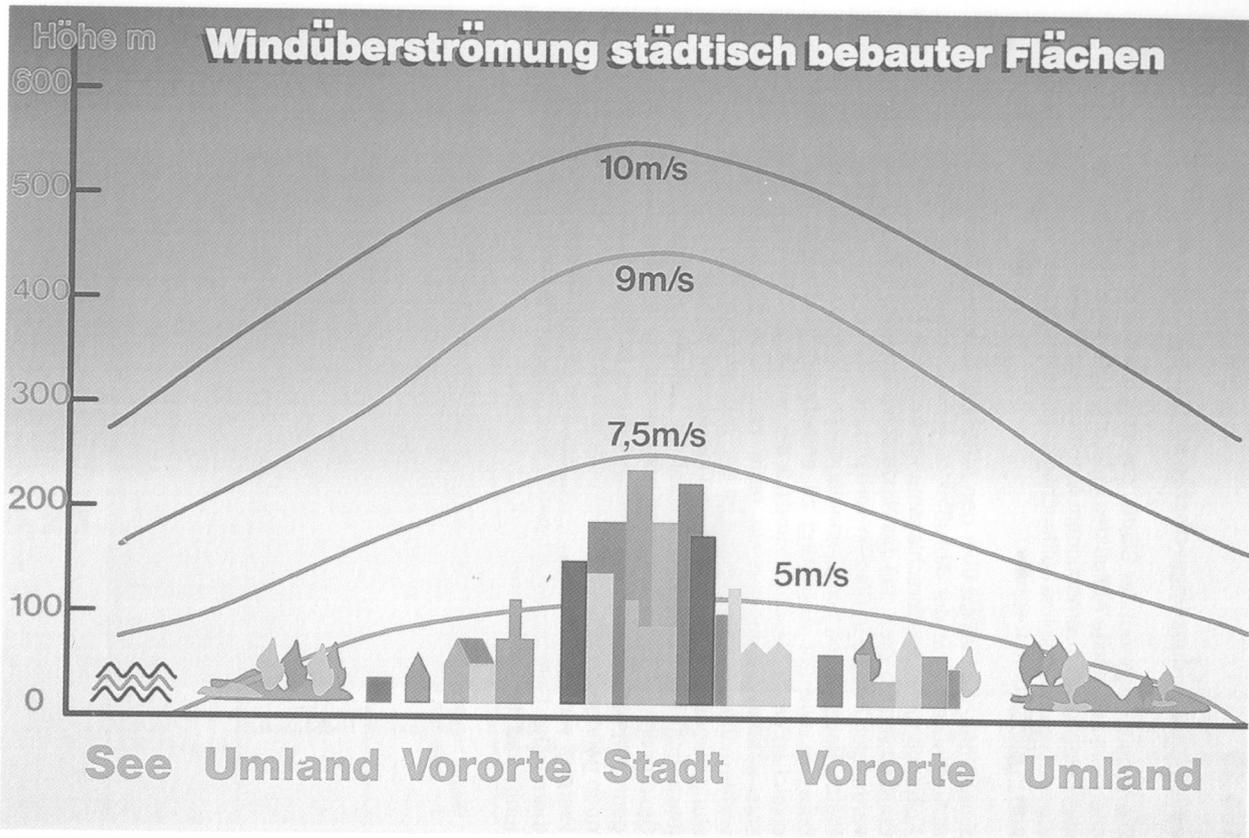
Eine Größe, die indirekt über den Anteil der Verdunstung Auskunft gibt, ist der Abflußbeiwert bzw. der Abflußfaktor, jene Zahl, die aus dem Verhältnis von Abflußmenge zu Niederschlagsmenge bestimmt wird.

Ein Wert von 1 besagt, daß das Niederschlagswasser gänzlich abfließt und nicht verdunstet. Für die in Städten vorhandenen künstlichen Oberflächen (Straßen, Plätze, Hausdächer, Schienenanlagen u.a.m.) ergeben sich relativ hohe Abflußbeiwerte, wie der Abbildung zu entnehmen ist. Dächer und Betondecken erreichen Werte zwischen 1 und 0,9, d.h. nur bis zu 10% des Niederschlagswassers können verdunsten. Je mehr natürliche speicherfähige Oberflächen vorherrschen, um so geringer ist der Wasserabfluß, desto stärker die Verdunstung, wodurch den benetzten Oberflächen Verdunstungswärme entzogen (etwa $2500 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ Wasser)¹ und somit die Lufttemperatur gesenkt wird.

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.

Hieraus wird ersichtlich, in welcher Weise ein verstärkter Abfluß auf das thermische Geschehen eines Stadtgebietes in Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad der Oberflächen Einfluß nimmt.

¹ Hierbei handelt es sich um diejenige Energie, die benötigt wird, um 1 g Wasser zu verdunsten, J = Joule; g = Gramm.



Dia 20

Windüberströmung städtisch bebauter Flächen

Städtisch bebaute Flächen setzen die Windströmung in mehr oder weniger starkem Maße durch die Anordnung von Gebäuden und deren Höhe ein Hindernis entgegen, so daß die Windgeschwindigkeit im Vergleich zum unbebauten Freiland geringere Werte aufweist. Durch die Abbremsung des Windes wird der Luftaustausch in den Straßenschluchten vermindert.

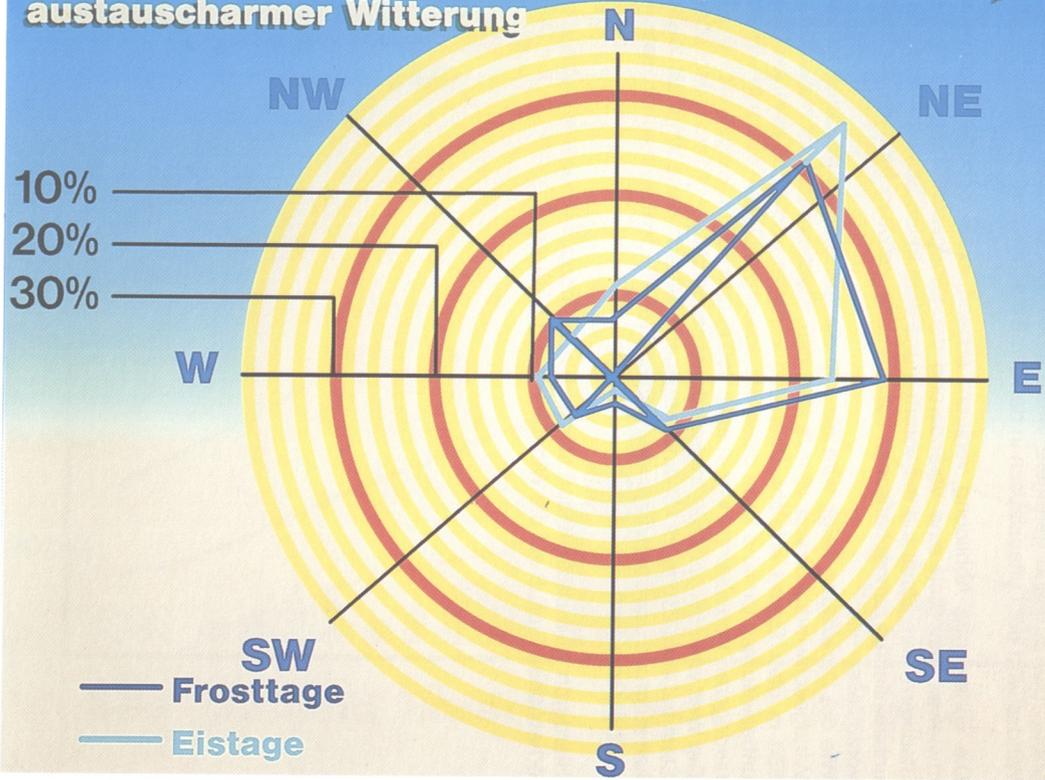
Die vorliegende Abbildung versucht anhand eines Schemas darzustellen, inwieweit man sich eine Veränderung der Windgeschwindigkeit über dem Stadtkern, dem Stadtrand mit Vororten und dem freien Land im Vergleich zur unbeeinflussten atmosphärischen Luftströmung – etwa in 1000 m über Grund – vorzustellen hat.

Wie die Darstellung zeigt, wird die – in diesem Beispiel gewählte – höchste Windgeschwindigkeit von 10 m/s über dem Stadtkern in einer Höhe von etwa 550 m über Grund erreicht. Über den Vororten und über dem weitgehend unbeeinflussten Umland kann diese Windgeschwindigkeit schon in wesentlich niedrigeren Höhen, und zwar in etwa 450 m und 300 m, festgestellt werden.

Der Wert von 75% der Ausgangswindgeschwindigkeit (= 7,5 m/s) liegt über der Stadt bei etwa 250 m, im Umland hingegen stellt sich diese Windgeschwindigkeit aufgrund des überwiegenden Fehlens von Hindernissen schon bei rund 50 m über Grund ein.

Hierdurch wird deutlich, daß städtisch oder industriell bebaute Gebiete einen erheblichen Einfluß auf die Windbewegung besitzen.

Windströmung in einer Stadt während winterlicher, austauscharmer Witterung



Dia 21

Windströmung in einer Stadt während winterlicher, austauscharmer Witterung

In unserem Klimabereich wehen im langjährigen Mittel Winde überwiegend aus dem Sektor Süd bis West. Da diese meist mit Tiefdruckwetterlagen verknüpften Luftströmungen häufig mit relativ großen Geschwindigkeiten und starker Turbulenz einhergehen, sind sie für den Abtransport städtischer und industrieller Schadstoffe von Wichtigkeit.

Für den Bereich der Planung mit Blick auf die Lageverteilung abgasintensiver Industrie- und Gewerbebetriebe sind hingegen solche Windrichtungen von großem Interesse, die bei austauscharmen Wetterlagen vorherrschen. Letztere sind durch thermostabile Inversionen, Trockenheit, Windarmut und im Winter meist durch strenge Kälte charakterisiert.

Was die Standorte von Industrie- und Gewerbebetrieben anbelangt, sollte man sich deshalb bei der Planung nicht am langjährigen Mittel der vorherrschenden Windverteilungen orientieren, sondern an dem, was sich während austauscharmer Wetterlagen einstellt.

Wertet man z.B. die Windrichtungs- und -geschwindigkeitsdaten ausschließlich für kalte und sehr kalte Tage aus (diese treten überwiegend unter Vorherrschaft kalter, winterlicher Hochdruckgebiete auf), dann ergibt sich für Frost-¹ und Eistage² eine völlig andere Verteilung der Windrichtung, als sie im langjährigen Mittel auftritt. Die vorliegende Abbildung zeigt eine solche Auswertung für einen Zeitraum von 21 Jahren (Station Lünen, 1953-1973). Die hierfür dargestellte Windrose weist ganz eindeutig auf das Überwiegen der östlichen bzw. nordöstlichen Windrichtungen hin.

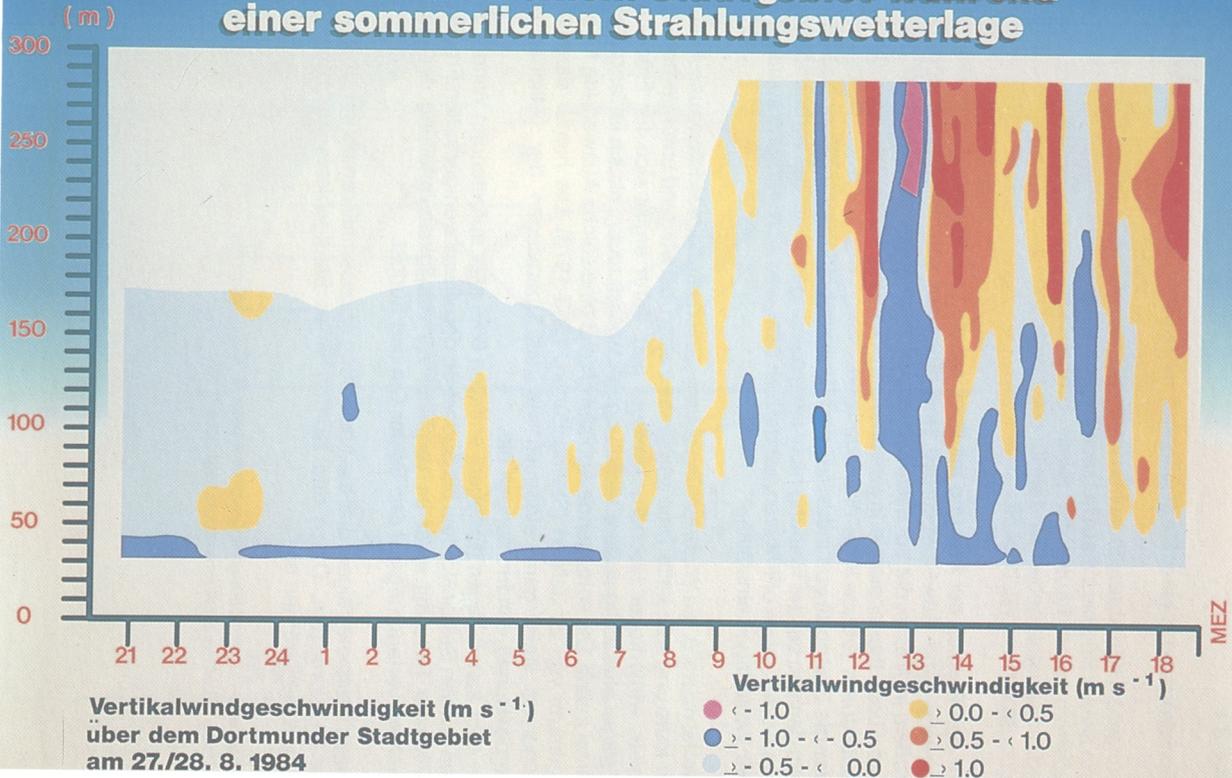
An sehr kalten Tagen (Eistagen) entfallen 66% aller auftretenden Windrichtungen auf den Sektor Nordost bis Südost, an den etwas weniger kalten Frosttagen 67% aller Fälle mit einer im Vergleich zur Häufigkeitsverteilung der Eistage leichten Verlagerung auf den Sektor Ost und Südost.

Diese Beispiele zeigen, daß die Ansiedlung abgasemittierender Industriebetriebe im Nordosten, Osten und Norden eines Stadtgebietes möglichst nicht zugelassen werden sollte.

1 Frosttag = Lufttemperaturminimum liegt unter 0 °C

2 Eistag = Lufttemperaturmaximum liegt unter 0 °C

Konvektion über einem Stadtgebiet während einer sommerlichen Strahlungswetterlage



Dia 22

Konvektion über einem Stadtgebiet während einer sommerlichen Strahlungswetterlage

Die vorliegende Abbildung zeigt für einen Meßstandort in der Stadt Dortmund die Verteilung der Vertikalwindgeschwindigkeit für eine sommerliche Strahlungswetterlage.

Die Messung erfolgte in der Nacht des 27.8.1984 bis zum frühen Morgen des 28.8.1984 zwischen dem Boden und einer Höhe von 170 m über dem Stadtgebiet, am Tage des 28.8.1984 bis zu einer Höhe von 290 m. Die in den Nachtstunden vorherrschenden blauen und gelben Farbtöne weisen darauf hin, daß es sich bodennah um vertikal abwärts gerichtete Windströmungen handelt, die Geschwindigkeiten zwischen 1 m/s und 0,5 m/s (dunkelblaue Flächen) aufweisen; zeitweise wird die Abwärtsbewegung (z.B. zwischen 23 und 24 Uhr und zwischen 7 und 11.30 Uhr) von Windstillen abgelöst (hellblaue bzw. gelbe Flächen).

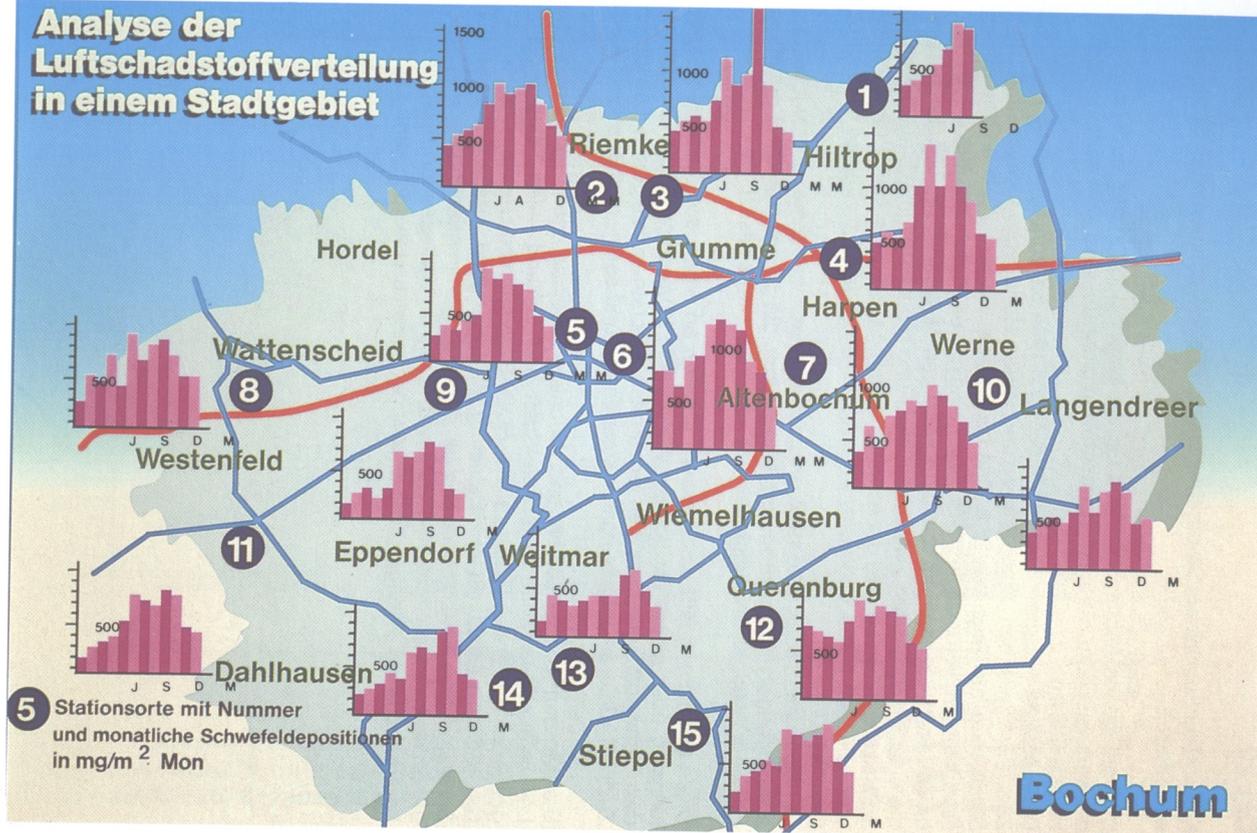
Im Tagesverlauf des 28.8.1984 entsteht eine sich zunehmend entwickelnde, aufwärtsgerichtete Luftströmung (Konvektion), die (in den dunkelrot gefärbten Flächen) Windgeschwindigkeiten von mehr als 1 m/s besitzt.

Diese Darstellung läßt eindrucksvoll die sich an einem sommerlichen Strahlungstag über einem Stadtgebiet einsetzende Konvektion erkennen, die u.a. dazu führt, daß die über den erwärmten Flächen aufsteigende Luft durch Zustrom kühlerer Umgebungsluft kompensiert und somit „nachgesogen“ wird.

Die Messungen, die einen sehr wichtigen Beitrag zum Verständnis der Luftaustauschvorgänge zwischen Stadt und Umland liefern, sind möglich geworden durch den Einsatz eines „SODAR“ genannten Geräts.

Das SODAR-Gerät (SONic Detecting And Ranging) erfaßt mit Hilfe von Schallimpulsen verschiedene Dichten der bodennahen Atmosphäre, wodurch – bei unterschiedlich zeitlicher Anwendung wie im vorliegenden Beispiel – die Veränderung der Windgeschwindigkeit nachgewiesen werden kann.

Analyse der Luftschadstoffverteilung in einem Stadtgebiet



Dia 23

Analyse der Luftschadstoffverteilung in einem Stadtgebiet

Die Luftschadstoffverteilung von Schwefelkomponenten im Stadtgebiet von Bochum wurde unter Einsatz von 15 Meßstationen über ein Jahr lang gemessen. Der hierfür zugrundegelegte Meßzeitraum von Juni 1983 bis Mai 1984 zeigt für die einzelnen Standorte Werte, die sich monatlich deutlich unterscheiden.

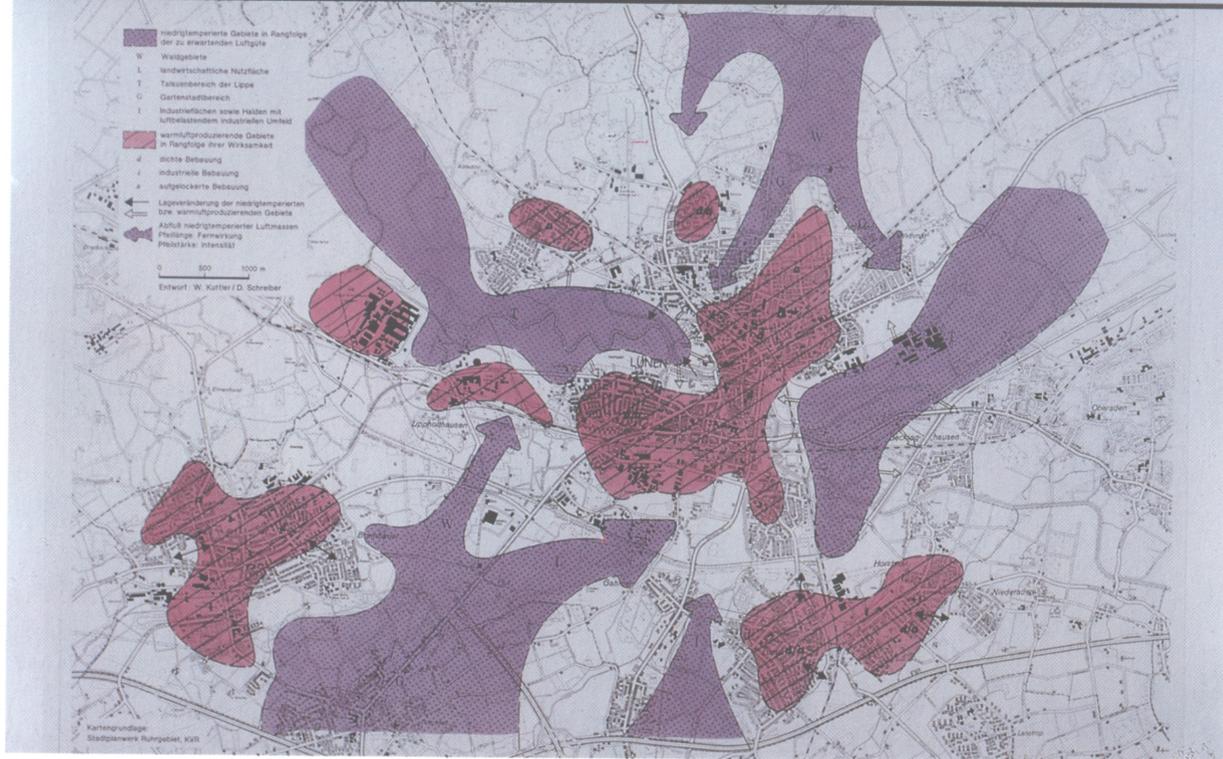
Erfaßt wurden die überwiegend gasförmigen Schwefelkomponenten der Luft mit Hilfe von SAM- (Surface Active Monitoring) Geräten, die nach dem Prinzip der Anlagerung saurer Luftverunreinigungen an mit K_2CO_3 aktivierten Filterflächen arbeiten. Nach der Analyse der Rezeptorflächen im Labor lassen sich aus den gewonnenen Daten die Schwefel-Immissionsraten mit der Einheit Milligramm Schwefel pro Quadratmeter und Tag ($= mg S/m^2 \cdot d$) bzw. Milligramm Schwefel pro Quadratmeter und Monat ($= mg S/m^2 \cdot Monat$) berechnen.

Bei der Auswahl der Meßstandorte wurden verschiedene Faktoren berücksichtigt, z.B. die Bebauungsdichte, das Verkehrsaufkommen, die Lage zum Straßenverkehr und die Nähe von Grünflächen, wodurch kleinräumige Filtereffekte erkannt werden können.

Die höchsten Werte der Schwefel-Immissionsraten wurden an Stationen erreicht, die in dicht bebauten Gebieten lagen, die niedrigsten Werte dort, wo mehr Grünumgebung auftrat. Daß dies nicht nur für den Bochumer Süden zutrifft – er gilt zu Recht als mit Grünflächen durchsetzt und stellt eine bevorzugte Wohngegend dar – zeigt sich an den Stationen 9 und 11, die in dicht bebauter Umgebung einen guten Grünschutz besitzen. Wie wichtig in lufthygienischer Hinsicht ein wenig Grün sein kann, wird ferner an den Werten der Station 5 deutlich, die trotz ihrer Lage im Innenstadtbereich, durch eine Hecke geschützt und etwas eingesenkt, nur geringe Immissionsraten aufweist, viel geringere z.B. als Station 6 in vergleichbarer Lage, aber ohne Begrünung.

Erwartungsgemäß läßt sich für die Schwefeldepositionen ein deutlicher Jahresgang feststellen. Die Werte steigen mit Zunahme der Verfeuerung fossiler Brennstoffe in der kalten Jahreszeit an. Der besondere, auch jahreszeitlich bedingte Einfluß von Grünstreifen zeigt sich gerade am Hochschnellen der Immissionsraten in der kalten Jahreszeit, wenn durch Laubfall die Filterwirkung herabgesetzt wird.

Klimafunktionskarte, dargestellt am Beispiel der Stadt Lünen



Dia 24

Klimafunktionskarte, dargestellt am Beispiel der Stadt Lünen

An Tagen mit sommerlichem Strahlungswetter kann aufgrund der mit Beton, Asphalt oder Ziegelsteinen meist vollständig verschlossenen städtischen Bodenoberflächen die gesamte Strahlungsaufnahme in fühlbare Wärme umgewandelt werden, da das Verdunstungsphänomen infolge des Fehlens feuchter Bodenoberflächen weitgehend ausgeschlossen ist. Die künstlich versiegelten Oberflächen stellen deshalb die eigentlichen wärmeluftproduzierenden Flächen bzw. wärmeluftproduzierende Räume dar. Einfach- und Mehrfachreflexionen in Straßenschluchten erhöhen darüber hinaus den Erwärmungsgrad. Es ergibt sich für die innerstädtischen Wärmequellen eine Abstufung nach ihrer Intensität, die sich am Grad der Oberflächenversiegelung und der Bebauungsdichte orientiert. Auf die in der Abbildung dargestellten Klimafunktionskarte wurden deshalb nachfolgend aufgeführte wärmeluftproduzierende Gebiete unterschieden:

d = dichte Bebauung (Wohn- und Geschäftsviertel)

i = industrielle Bebauung

a = aufgelockerte Bebauung

Die über diesen Gebieten aufsteigende Warmluft sorgt dafür, daß aus dem städtischen Umland Luft nachgesogen wird, die jedoch nach ihrer Herkunft unterschiedliche Qualitäten aufweisen kann. Beste Luftqualitäten sind zu erwarten, wenn Luft aus nicht bebautem Umland, z.B. Waldgebieten, den überwärmten Regionen zufließt. Hierbei muß jedoch die Höhenlage der zu untersuchenden Flächen berücksichtigt werden. Freiflächen, die niedrigtemperierte Luftmassen produzieren und in reliefiertem Gelände Hochlagen einnehmen, können – da Kaltluft schwebend dem Geländegefälle entsprechend bei autochthoner Witterung Tieflagen zufließt – diese sowohl mit Frischluft versorgen als auch gleichzeitig dort lufttemperaturmindernd wirken. Freiflächen, die sich dagegen in tiefer Lage befinden, wie u.a. die die Stadtfläche in Ost-West-Richtung querende mehr oder weniger breite Talaue der Lippe (50-55 m ü. NN), lassen einen Transport niedrigtemperierter Luftmassen in überwärmte Gebiete dann nicht zu, wenn durch die überwärmten Flächen keine Ausgleichsströmung in die bebauten Gebiete hinein induziert wird. Dennoch wird der kaltluftproduzierende Talauenbereich (Kürzel T in der Klimafunktionskarte) in dem Augenblick als Kaltluftzufluß für das Stadtgebiet wirksam, wenn eine leichte, möglicherweise durch die Wetterlage verursachte Luftströmung die kühlen, feuchteren Luftmassen in die überwärmten Gebiete drückt, wie dies zum Beispiel durch die kleinen Pfeile der niedrigtemperierten Gebiete für die Lippeaue in der Klimafunktionskarte dargestellt wurde.

Für die bereits unter dem Buchstaben a (aufgelockerte Bebauung) und i (industrielle Bebauung) beschriebenen Luftgüten gilt ähnliches wie für die in den niedrigtemperierten Gebieten liegenden Gartenstadtbereiche G und Industrie-
flächen I . Aufgelockert bebaute Wohngebiete – Gartenstadtbereiche – die in den Randgebieten fast in allen Stadtteilen von Lünen auftreten, lassen wegen des *versiegelten Gebietes* nur eine Einstufung der Luftgüte als gering im Vergleich

zu anderen Flächen zu. Die unter dem Buchstaben *i* zusammengefaßten industriell genutzten Flächen lassen keine einheitlich bewertbare Luftgüte erkennen.

Ebenso wie die übertemperierten Gebiete der Stadtfläche von Lünen (Schraffur in der Karte) nach Art ihrer Bebauung und somit nach dem Grad ihrer potentiellen Luftgüte differenziert wurden, so wurden auch die niedrig temperierten Flächen (punktierte Flächen) im Hinblick auf eine Abschätzung der Luftqualität nach folgenden Unterscheidungskriterien gegliedert (in Rangfolge der zu erwartenden Luftgüte):

W, *L* = Luft aus Waldgebieten bzw. von landwirtschaftlich genutzten Flächen

T = Talauenbereiche der Lippe

G = Gartenstadtbereich

I = Industriegelände sowie Halden mit luftbelastendem industriellem Umfeld

Für die Stadtfläche von Lünen kann festgestellt werden, daß Gebiete mit städtischer Überwärmung in Lünen-Zentrum, Lünen-Süd/Horstmar und in Brambauer auftreten. Kleine Flächen, auf denen sich im Vergleich zu ihrer Umgebung höhere Lufttemperaturen einstellen, fallen mit dem Industriegelände der Aluminiumwerke und dem der STEAG zusammen.

Ein Zufluß niedrigtemperierter Luftmassen konnte aus dem Raum Brechten, zwischen Brambauer und Gahmen gelegen, nachgewiesen werden. Dem leichten, nach Norden gerichteten Geländegefälle folgend, streben diese Luftmassen einerseits dem Raum Gahmen, Gahmener Straße, Industriegebiet Kupferstraße zu, andererseits dem Ortsteil Lippoltshausen und der STEAG. Die Qualität dieser Luftmassen dürfte sich insbesondere in der Abflußbahn nach Lippoltshausen bessern, da etwa von der Straße ‚Im Siepen‘ in Richtung Norden ein Waldgebiet durchströmt wird, das luftqualitätsverbessernd wirkt. Die kleinflächigen Wärmeinseln der Stadtteile Brambauer, Lünen-Süd und Horstmar treten im Vergleich zur übertemperierten Fläche von Lünen-Zentrum bei Strahlungswetterlagen thermisch weniger in Erscheinung. Die kleineren wärmeabsorbierenden Flächen in diesen Stadtteilen sorgen für einen stärkeren Konfigurationswechsel untereinander.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß einzelne, meist bebauungsbezogene warmluftproduzierende Flächen auftreten, die durch Kühlwirkung der Lippeaue einerseits und durch den Kaltluftabfluß aus den Cappenberger Höhen im Norden andererseits in ihrer Ausprägung stark modifiziert werden können. In den Stadtteilen Brambauer, Lünen-Süd und Horstmar ist der Anteil der überwärmten Fläche an der bebauten Fläche kleiner und thermisch weniger intensiv ausgebildet, wodurch es bei leichter Windbewegung relativ schnell zu einem Gestaltwechsel der entsprechenden Wärmeinsel kommt.

Quellenverzeichnis der Vorlagen zu den Dia-Abbildungen:

Die Daten und Abbildungen, die für die Diapositive 11, 13, 16, 18, 23 verwendet wurden, entstammen meist unveröffentlichten Projektarbeiten, die der Verfasser in den letzten Jahren durchführte.

- Dia 1:** Daten z.T. nach ADAM (1985) und LANDSBERG (1981)
- Dia 2:** KUTTLER, unveröff.
- Dia 3:** Daten nach LUFTREINHALTEPLAN RUHRGEBIET MITTE (1980-1984)
- Dia 4:** KUTTLER, unveröff.; Daten: Statistisches Amt der Stadt Bochum
- Dia 5:** FUKUOKA (1983)
- Dia 6:** BLÜTHGEN & WEISCHET (1980)
- Dia 7:** GERTIS (1977)
- Dia 8:** Aufnahme des Kommunalverbands Ruhrgebiet
- Dia 9:** Aufnahme des Kommunalverbands Ruhrgebiet
- Dia 10:** KUTTLER (1985)
- Dia 12:** KUTTLER & SCHREIBER (1984); Kartengrundlage: Stadtplanwerk Ruhrgebiet. Vervielfältigt mit Genehmigung des Kommunalverbandes Ruhrgebiet, Essen 1987.
- Dia 14:** Aufnahme A. PFLITSCH
- Dia 15:** KEIL & SCHNELLE (1981)
- Dia 17:** KUTTLER & SCHREIBER (1984); Kartengrundlage: Stadtplanwerk Ruhrgebiet. Vervielfältigt mit Genehmigung des Kommunalverbandes Ruhrgebiet, Essen 1987.
- Dia 19:** KUTTLER (1985)
- Dia 20:** KUTTLER, unveröff.
- Dia 21:** KUTTLER & SCHREIBER (1984)
- Dia 22:** Aufnahme des Kommunalverbands Ruhrgebiet
- Dia 24:** KUTTLER & SCHREIBER (1984), Kartengrundlage: Stadtplanwerk Ruhrgebiet. Vervielfältigt mit Genehmigung des Kommunalverbandes Ruhrgebiet, Essen 1987.

Literatur

(Die nachfolgende Zusammenstellung enthält neben der im Text genannten Literatur eine Auswahl weiterer wichtiger stadtklimatologischer Arbeiten)

- ADAM, K. (1985)** Die Stadt als Ökosystem. In: Geographische Rundschau, 37, Heft 5, S. 214-225.
- ADAM, K., & T. GROHE (1984)** Ökologie und Stadtplanung. Erkenntnisse und praktische Beispiele integrierter Planung. Köln.
- BACH, W. (1970)** Strahlungshaushalt und lufthygienische Verhältnisse in Groß-Cincinnati, USA. – In: Deutscher Geographentag, Kiel 1969, S. 273-282.
- BECKRÖGE, W., & J. FRANK (1986)** Einsatz von SODAR-Geräten bei Messungen in der städtischen Grenzschicht. – In: Staub-Reinhaltung der Luft, 12, Bd. 46, S. 523-527.
- BLÜTHGEN J., & W. WEISCHET (1980)** Allgemeine Klimageographie. Lehrbuch der Allgemeinen Geographie 2. Berlin.
- BÖHM, R. (1979)** Stadtentwicklung und Trend der Wärmeinselintensität. – In: Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 27, S. 31-46.
- BRAHE, P. (1974)** Klimatische Auswirkungen von Gehölzen auf umbauten Stadtplätzen. – In: Das Gartenamt 2, S. 57-70.
- CHANDLER, T.J. (1970)** Selected Bibliography on Urban Climate. – In: WMO (= World Meteorology Publication), No. 276, T.P. 155, 383 pp.
- ERIKSEN, W. (1972)** Zur Niederschlagsmodifikation im Bereich von Großstädten. – In : Städtehygiene, S. 164-166.
- ERIKSEN, W. (1975)** Probleme der Stadt- und Geländeklimatologie. (Erträge der Forschung, Bd. 35). Darmstadt.
- ERIKSEN, W. (1976)** Die städtische Wärmeinsel. – In: Geographische Rundschau 28, H. 9, S. 368-373.
- ERIKSEN, W. (1979)** Grundlagen und städtebauliche Bedeutung des Stadtklimas. – In: Spektrum des Wissens 72, H. 2/3/4, S. 77-81.

- FEZER, F. (1977)** Klimauntersuchungen als Planungshilfe. – In: FEZER, F., & R. SEITZ (Hrsg.): Klimatologische Untersuchungen im Rhein-Neckar-Raum. – In: Heidelberger Geographische Arbeiten, H. 47.
- FEZER, F., & H. KARRASCH (1985)** Stadtklima. – In: Spektrum der Wissenschaft, Nr. 8, S. 66-81.
- FUKUI, E. (1970)** The recent rise of temperature in Japan. – In: Japanese Progress in Climatology, Tokyo University of Education, pp. 46-65.
- FUKUOKA, Y. (1983)** Physical Climatological Discussion on Causes of Urban Temperature. – In: Memoirs of the Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, Series IV, Volume 8, pp. 157-178.
- GERTIS, K. (1977)** Bauphysikalische Aspekte des Stadtklimas. – In: FRANK, E. (Hrsg.): Stadtklima. Ergebnisse und Aspekte für die Stadtplanung, S. 87-96.
- HÖSCHELE, K., & H. SCHMIDT (1974)** Klimatische Wirkungen einer Dachbegrünung. – In: Garten und Landschaft 84, S. 334-337.
- KEIL, K. & F. SCHNELLE (1981)** Phänologische Beobachtungen und Klimaschwankungen. – In: Meteorologische Rundschau 6, S. 180-181.
- KRATZER, A. (1956)** Das Stadtklima, 2. Aufl., Braunschweig 1956.
- KUTTLER, W. (1984)** Untersuchungen zum Bochumer Stadtklima. – In: Gesellschaft der Freunde der Ruhr-Universität Bochum (Hrsg.): Jahrbuch Ruhr-Universität Bochum 1984, S. 99-114.
- KUTTLER, W. (1985)** Stadtklima. Struktur und Möglichkeiten zu seiner Verbesserung. – In: Geographische Rundschau 37, Heft 5, S. 226-233.
- KUTTLER, W., & D. SCHREIBER (Hrsg.) (1984)** Stadt- und geländeklimatische Untersuchungen im südlichen Münsterland. – In: Materialien zur Raumordnung, Bd. XXV, Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- LANDSBERG, H.E. (1981)** The Urban Climate. – In: International Geophysics Series Volume 28. New York.
- LUFTREINHALTE-PLAN RUHRGEBIET MITTE (1980-1984)** Ministerium f. Arbeit, Gesundheit und Soziales (Hrsg.), Düsseldorf.

- MIESS, M. (1974)** Planungsrelevante und kausalanalytische Aspekte der Stadtklimatologie. – In: *Landschaft und Stadt*, H. 1, S. 9-16.
- MINKE, G. (1982)** Fassaden- und Dachbegrünung. Ein ökonomischer Beitrag zum ökologischen Bauen. In: U. SCHWARZ (Hrsg.): *Grünes Bauen*, S. 149-173.
- NÜBLER, W. (1979)** Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg. – In: *Freiburger Geographische Hefte* 16.
- OKE, T.R. (1982)** The energetic basis of the urban heat island. – In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Nr. 108, pp. 1-24.
- OKE, T.R. (1984)** Methods in urban climatology. 25th International Geographical Congress – In: *Zürcher Geographische Schriften* 14, S. 19-29.
- PLATE, E.J. (1974)** Der Wind als Faktor der Bauwerks- und Städteplanung. In: *Der Bauingenieur*, 49, S. 457-466.
- SCHÖLLER, P. (1983)** Zur Urbanisierung der Erde. Festvortrag zum 43. Deutschen Geographentag 1981, Mannheim. – In: *43. Deutscher Geographentag Mannheim*, 5. – 10.10.1981, Band 43, S. 25-34.
- STIEMER, S.F. (1977)** Windumströmung von Gebäuden und Gebäudeklima. – In: FRANKE, E. (Hrsg.): *Stadtklima, Ergebnisse und Aspekte für die Stadtplanung*.
- STOCK, P.; W. BECKRÖGE; W. KUTTLER; O. KIESE & H. LÜFTNER (1986)** Stadtklimaanalyse Dortmund, KVR-Planungsheft, Essen. Planungshilfe Ruhrgebiet, Po 18.
- WANNER, H. (1986)** Die Grundstrukturen der städtischen Klimamodifikation und deren Bedeutung für die Raumplanung. – In: *Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft*, Bd. 55, (Schweiz).
- WEISCHET, W. (1979)** Problematisches über die städtische Wärmeinsel und die Notwendigkeit einer Baukörperklimatologie. – In: *Siedlungsgeographische Studien*, S. 407-423.
- YOSHINO, M., & K. KAI (1973)** Change of air temperature in Japanese cities in the recent years and its relation to the synoptic patterns and population. – In: *Tenki*, 20, pp. 489-497.