
VDI BERICHTE 1330

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

VDI-GESELLSCHAFT ENERGIETECHNIK

UMWELT- UND KLIMABEEINFLUSSUNG DURCH DEN MENSCHEN IV

Möglichkeiten der Einflußnahme auf das Stadtklima

Dr. rer. nat. **A.-B. Barlag**, Essen

1. Einleitung

Unter dem Begriff Stadtklima wird eine auf den lokalen bzw. regionalen Bereich bezogene anthropogene Klimabeeinflussung verstanden, durch die urban-industrielle Gebiete weltweit charakterisiert werden.

Eingebettet in die verschiedenen Makroklimata lassen sich - trotz modifizierender Prägung durch die globale klimatische Vielfalt - die grundsätzlichen stadtklimatischen Eigenschaften auf gemeinsam auftretende Ursachen zurückführen. Diese sind begründet in

- der Bebauung und Versiegelung der urbanen Erdoberfläche,
- der Reduzierung der mit Vegetation bestandenen Flächen sowie
- der physikochemischen Veränderung der Stadtatmosphäre.

Aus den genannten Faktoren können bevorzugt während austauscharmer Strahlungswetterlagen human-bioklimatische Belastungen resultieren, die sowohl den thermischen, als auch den lufthygienischen Wirkungskomplex betreffen.

Die stadtklimatischen Auswirkungen stehen in Abhängigkeit von der Klimazone in der sich eine Stadt befindet. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die mittleren Breiten.

Stadtklimatologen, Stadtplanern und Architekten kommt die Aufgabe zu, mit geeigneten Mitteln die negativen Eigenschaften des Stadtklimas über flächenbezogene, verkehrs- und objektorientierte Planungen zu minimieren.

Dabei kann auf gesetzliche Vorgaben zurückgegriffen werden. Maßnahmen der Flächenplanung werden z. B. durch das BAUGESETZBUCH /1/ und durch das UVP-GESETZ /2/ rechtlich gestützt. Klimaverbessernde und emissionsmindernde Maßnahmen bei Verkehrs- und Objektplanungen sind in entsprechenden Verordnungen wie z. B. der 23. BImSchV /3/ oder der 3. WÄRMESCHUTZVERORDNUNG /4/ verankert.

2. Handlungsfelder der anwendungsorientierten Stadtklimatologie

Die kompakt gestalteten Bebauungsstrukturen sowie die darin ablaufenden menschlichen Aktivitäten rufen im Vergleich zum unbebauten Umland vielseitige urbane Klimamodifikationen hervor, die in KUTTNER /5/ beschrieben werden. Aus den Ursachen, die zur Ausbildung des Stadtklimas führen, lassen sich stadtplanerische Ansätze zur Minimierung von Negativerscheinungen ableiten.

Ein Handlungsfeld der anwendungsorientierten Stadtklimatologie, das der indirekten klimatischen Einflußnahme zuzuordnen ist, liegt z. B. in der Auflockerung der Gebäudestruktur. Über flächenbezogene Maßnahmen kann durch Schaffung bzw. Sicherung von klimarelevanten Freiflächen diesem Ansatz entsprochen werden. Anforderungen an klimarelevante Freiflächen beziehen sich auf eine Angleichung der Strahlungs- und Energiebilanzen an diejenigen des Umlandes, auf die Verbesserung der Ventilationsverhältnisse sowie auf eine Reduzierung der urbanen Luftbelastung. Je nach Beschaffenheit eines nicht bebauten Areals in Hinblick auf Versiegelung, Rauigkeit, Vegetationsstruktur und Größe kommt derartigen Bereichen eine mehr oder minder ausgeprägte Klimarelevanz zu. Als Freiflächen mit einer vielseitigen Klimafunktion gelten vor allem Grünanlagen. Unversiegelte und mit Vegetation bestandene Areale weisen im Gegensatz zu anderen Oberflächentypen ein geringeres Wärmespeichervermögen sowie eine erhöhte Evapotranspiration auf und können somit ein günstiges Bioklima erzeugen sowie zur Kaltluftbildung beitragen. Die bei aufgelockerter Vegetationsstruktur bestehende geringe Rauigkeit dieser Freiflächen setzt dem bis zum Bodenniveau durchgreifenden Gradientwind sowie Kaltluftflüssen niedrige aerodynamische Strömungswiderstände entgegen, so daß die städtische Ventilation insbesondere während windschwacher Wetterlagen aufrechterhalten bleibt. Zusätzlich filtern Vegetationsstrukturen Spurenstoffe aus der Luft. Unter der Voraussetzung einer klimagerechten Gestaltung kann Grünflächen folglich eine hohe meliorierende Wirkung in bezug auf das Stadtklima zugesprochen werden.

Als Quellen anthropogener Luftverunreinigungen gelten Kfz-Verkehr, Hausbrand und Industrie. Insbesondere die erstgenannten Spurenstoffquellen treten konzentriert in Städten auf und sind als bodennahe Emittenten zum Hauptverursacher urbaner Luftbelastungen geworden. Hier bestehen Ansätze zu direkt gesteuerten stadtklimatologischen Handlungsfeldern, die sich auf Szenarien zur Lenkung des Kfz-Verkehrs sowie auf regulierende Eingriffe bei der Errichtung und dem Betrieb von Gebäuden stützen.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich daher auf ein stadtplanerisches Instrumentarium, das die Steigerung der klimameliorierenden Effekte urbaner Grünflächen und die Möglichkeiten emissionsmindernder Maßnahmen im Bereich Kfz-Verkehr und Gebäudebetrieb zum Inhalt hat.

3. Zur Bedeutung urbaner Grünflächen für das Stadtklima

Grünflächenplanung erstreckt sich auf innerstädtische und am Stadtrand gelegene Areale, deren Wirkungen entweder auf die Fläche selbst beschränkt bleiben oder über das Areal hinaus gehen können (Fernwirkung). Aus stadtklimatischer Sicht sind vor allem Grünflächen mit Auswirkungen auf die umgebende Bebauung von Interesse.

Innerstädtische Grünflächen

Nach HORBERT et al. /6/ wird die Fernwirkung einer innerstädtischen Grünanlage in die Bebauung hinein durch die Zusammensetzung des Vegetationsbestandes, durch die Übergangsstrukturen und durch die Größe der Grünanlage bestimmt. In Hinblick auf die vielfältigen Klimafunktionen, die eine urbane Grünfläche erfüllen kann, ist eine Vegetationsstruktur mit kurzgehaltener Wiese, einzelnen großkronigen Baumgruppen im Innenbereich und nicht zu dicht gesetzter Strauchvegetation am Außenrand zu empfehlen. Diese Vegetationsstruktur ("Savannentyp") weist zwei Vorteile auf: Tagsüber erfolgt eine Beschattung durch Bäume, die für Abkühlung sorgt. Nachts werden über den Grasflächen durch maximale Ausstrahlung niedrige Temperaturen erreicht, so daß Kaltluft gebildet wird. Die locker besetzte Randzone ermöglicht nachts das Übertreten von Kaltluft in die wärmere Umgebung und erschwert am Tage das Eindringen von spurenstoffbelasteter Luft in die Grünanlage hinein. Als ungünstige Standorte für Grünflächen erweisen sich Muldenlagen, da die nachts gebildete Kaltluft nicht ohne gradientbedingten Antrieb in die höher gelegene Umgebung transportiert wird.

HORBERT /7/ schreibt innerstädtischen Grünanlagen, die kleiner als 50 ha sind, keine Fernwirkung zu. Es muß daher nach Möglichkeiten gesucht werden, dem Mangel an stadtklimarelevanten Freiflächen innerhalb urbaner Räume entgegenzutreten.

Vernetzung innerstädtischer Grünflächen

Der durch urbane Verdichtung hervorgerufenen Verkleinerung und Verinselung innerstädtischer Grünflächen kann durch Vernetzung einzelner Freiflächen zu einem innerstädtischen Verbundsystem entgegengewirkt werden. Die Ausweisung von Nutzungstypen, die unter die Erde verlegt werden können (Sammelgaragen, Straßen) sowie die Identifizierung von Flä-

chen, deren Nutzungsintensität sich im Laufe der Zeit verändert hat und somit deren bisherige Oberflächenbedeckung nicht mehr benötigt wird, bilden ein großes Potential an begrünungsfähigen Arealen. Industriebrachen und ungenutzte Bahnlinien stellen großflächige Rückbaumöglichkeiten dar, wobei auch Wasserflächen wegen ihrer günstigen Auswirkungen auf das Umgebungsklima mit in die Planung der Vernetzung klimawirksamer Freiflächen einbezogen werden sollten /8/.

Aber auch im kleinräumigen Bereich kann der städtische Grünflächenanteil erhöht werden. Innerhalb dichter Wohnbebauung (vorrangig Zeilen- und Randbebauung) bieten überdimensionierte Aufenthaltsplätze, starke Innenhofversiegelungen, hohe Kfz-Stellplatzanteile und verkehrstechnische "Übererschließungen" eine Vielzahl von Rückbaumöglichkeiten, die mit Hilfe verschiedener Maßnahmen erfolgen können /9/. Durch Abschattungen großkroniger Bäume wird z. B. die strahlungsbedingte Erhitzung von Oberflächen wärmespeichernder Materialien verringert. Wo durch die Gebäudekonfiguration Baumanpflanzungen die Belüftungsverhältnisse zu sehr einschränken würden (z. B. in engen Straßen oder Innenhöfen), bieten sich Hausbegrünungen an. Hausbegrünungen können sowohl für Fassaden als auch für Dächer mit einer Neigung bis zu 35° empfohlen werden. Mit geeigneten Pflanzen kann ein Gebäudebewuchs erzielt werden, dessen Gesamtblattoberfläche etwa ein 10-faches der entsprechenden Hauswand einnimmt und die Blattoberfläche spezieller Gräser für Dachbegrünungssysteme 100mal so groß ist wie das Dach selbst. Unter Verwendung derartiger Vegetationsstrukturen sind positive Auswirkungen auf das Stadtklima bereits bei einem begrünten Anteil von 5 % bis 10 % aller vertikalen, geneigten und horizontalen Gebäudeflächen eines Siedlungsraumes nachweisbar /10/.

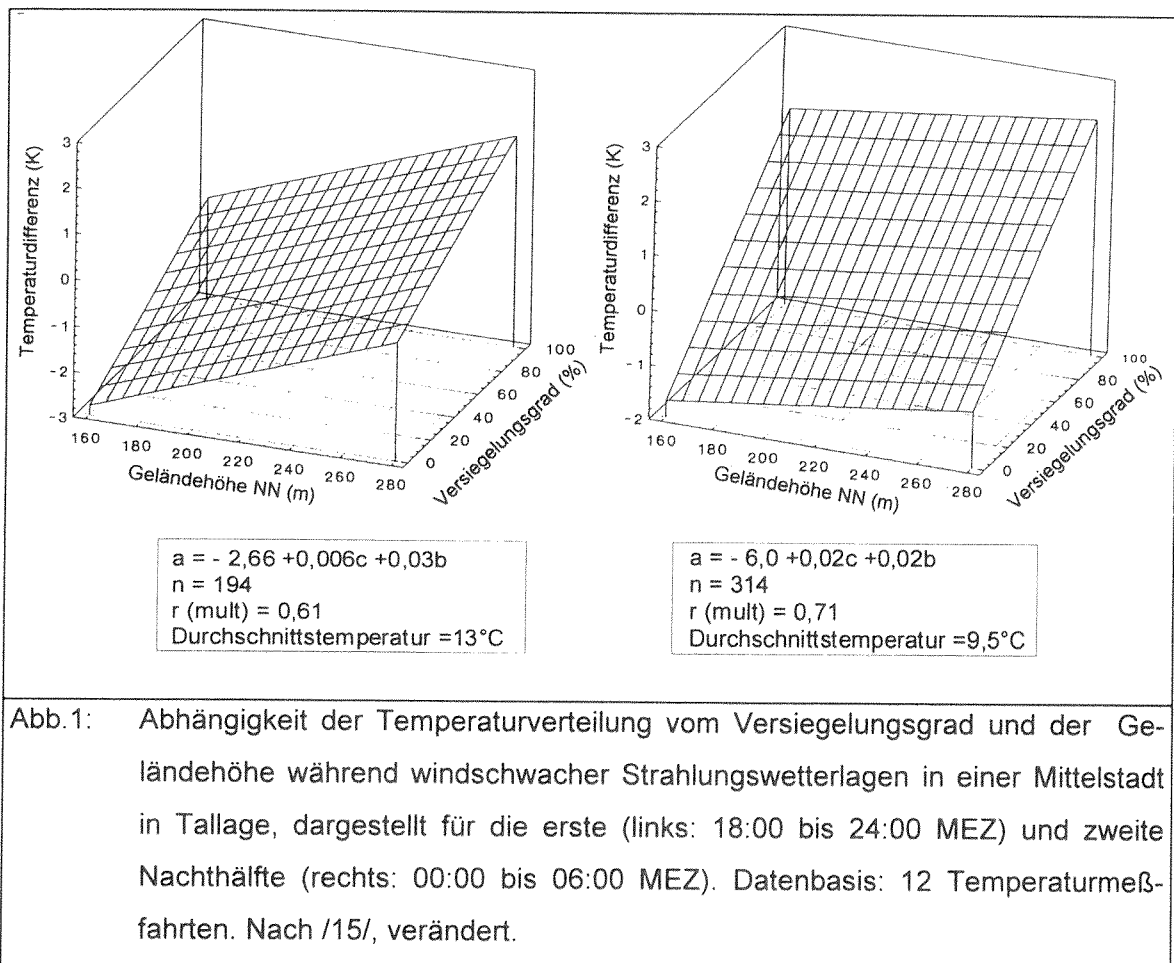
Grünflächen in Stadtrandlage

Da innerstädtischen Grünflächen in Hinblick auf Größe und Lage zwischen kompakten Gebäudestrukturen eine stadtklimarelevante Fernwirkung eher selten zugeschrieben werden kann, müssen Anstrengungen unternommen werden, das Stadtklima auch von außen zu steuern. Grünflächen am Stadtrand kommen während das Stadtklima belastender windschwacher Strahlungswetterlagen insbesondere als Kaltluftproduktionsgebiete große Bedeutung zu, wobei die Flächennutzung für die Erfüllung dieser Klimafunktion ausschlaggebend ist. Wiesen- und Weidenareale stellen gute Kaltluftproduzenten dar /11/, darüber hinaus weisen auch Waldareale ein hohes Kaltluftbildungspotential auf /12/.

Die von diesen Flächen abfließenden Kaltluftströme können vom übergeordneten Strömungsregime abgekoppelte Zirkulationssysteme im mikro- und mesoskaligen Bereich her-

vorrufen, deren Belüftungsfunktion für urbane Bereiche während Zeiten schwacher, nicht mehr bis ins Bodenniveau durchgreifender Gradientwinde, seit längerem erforscht werden. In Städten mit reliefiertem Terrain werden Kaltluftflüsse gravitativ erzeugt, deren Auswirkungen auf das Stadtklima u. a. von BARLAG /13/ untersucht wurden. Flurwinde, hervorgerufen durch den Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland, steuern dagegen die Kaltluftdynamik in Städten mit ebenem Gelände /14/.

Je nach Größe des Kaltluftvolumens können urbane Bereiche unterschiedlichster Ausdehnung durch diese Zirkulationssysteme ventiliert werden. Abb. 1 stellt - zeitlich differenziert - indirekt die Wirkung von Kaltluftabflüssen auf den nächtlichen Wärmeinseleffekt einer Mittelstadt in Tallage dar. In der ersten Nachthälfte kommt die starke Beeinflussung der Bebauung auf das bodennahe Temperaturfeld zum Ausdruck, wie der steile Anstieg der Regressionsfläche mit zunehmender Versiegelung belegt. In der zweiten Nachthälfte ist dagegen der auf der Talsohle (160 m bis 190 m NN) gelegene hochversiegelte Stadtkern wesentlich kühler als die Lufttemperatur auf den unversiegelten Talhängen.



Die Abnahme des Wärmeinseleffektes in der zweiten Nachthälfte ist auf zwischenzeitlich über die Talhänge in den Stadtkern eingedrungene Kaltluftströme zurückzuführen.

Die an diesem Beispiel dokumentierte zeitliche Verzögerung zwischen der bereits kurz nach Sonnenuntergang einsetzenden Kaltluftproduktion und dem erst in der zweiten Nachthälfte nachgewiesenen Kaltlufteffekt wirft das generelle Problem des Eindringens von Kaltluftströmen in die Bebauung hinein auf.

Stadtklimarelevante Luftleitbahnen

Ein möglichst schnelles und weit in einen Stadtkörper reichendes Eindringen der bereits kurz nach Sonnenuntergang produzierten Kaltluft bedarf stadtplanerischer Maßnahmen, die eine Auflockerung des Stadtrandbereiches durch Offenhalten von Gebäudezeilen berücksichtigen bzw. quer zu einem Kaltluftstrom angeordnete kompakte Bau- und Vegetationsformen vermeiden.

Als sehr wirkungsvoll erweisen sich in diesem Zusammenhang möglichst geradlinig vom Stadtrand in den Stadtkörper hineinreichende Luftleitbahnen, die zur effektiven Belüftung bei einer Länge von etwa 1000 m eine Breite von mindestens 50 m aufweisen und in Hinblick auf einen geringen Strömungswiderstand eine Rauigkeitslänge z_0 von 0,5 m nicht überschreiten sollten /16/.

Tab. 1 zeigt verschiedene Typen von Luftleitbahnen, die nach Art des Untergrundes und der Nutzung in Hinblick auf die Kühlwirkung und die lufthygienische Qualität der durch diese Schneisen transportierten Luft unterschiedlich zu bewerten sind. Aus den verschiedenen Kategorien geht hervor, daß Ventilationsschneisen aus klimatisch-lufthygienischen Gründen möglichst aus Grün- bzw. Wasserflächen bestehen sollten, deren Areal einschließlich des jeweiligen Umfeldes keine Emittenten aufweist.

Da sowohl schwache Gradientwinde als auch von diesen abgekoppelte Kaltluftzuflüsse im Idealfall aus allen Himmelsrichtungen auf eine Stadt zuströmen können, ist es sinnvoll, ein sternförmiges Netz von Luftleitbahnen innerhalb einer Stadt auszuweisen. Abb. 2 zeigt exemplarisch, daß über fünf radial um das Stadtzentrum Bochums angeordnete Luftleitbahnen das Einströmen von Flurwinden in den bebauten Bereich hinein möglich ist. Beachtenswert erscheint, daß an 100 % der registrierten Flurwindstunden der Wind aus mindestens zwei gegenüberliegenden Richtungen, an 72 % aus mindestens drei und an 20 % aus mindestens vier unterschiedlichen Sektoren gleichzeitig in die Stadt gelangte, wodurch der Ventilationsseffekt erheblich gesteigert werden kann.

Die bisher aufgeführten Möglichkeiten, das Stadtklima zu verbessern, sind nachweislich für die Qualität der bodennahen Stadtatmosphäre unerlässlich. Sie weisen jedoch den Nachteil auf, über flächenverbrauchende und damit kostenintensive Maßnahmen einem lediglich reagierenden Umweltschutz zugeordnet werden zu können.

<p>Tab.1: Luftleitbahnen und ihre Ventilationseigenschaften. Nach /17/, verändert.</p>
<p style="text-align: center;">Ein- und Ausfallstraßen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Überwiegend geringe Rauigkeitswerte - Kühleffekte tags und nachts gering - Zeitweise hohe Spurenstoffkonzentrationen durch Kfz-Verkehr und Hausbrand <p><i>Bewertung:</i> Als Ventilationsschneise nicht ohne weiteres zu empfehlen; Luftqualitätsanalyse notwendig.</p> <p style="text-align: center;">Bahntrassen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Überwiegend geringe Rauigkeitswerte - Kühleffekte tags gering, nachts hoch - Spurenstoffkonzentrationen durch Dieselloks möglich <p><i>Bewertung:</i> Als Ventilationsschneise nur bei nicht vorhandenem Diesellokbetrieb zu empfehlen.</p> <p style="text-align: center;">Grünflächen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Überwiegend geringe, vegetationsabhängige Rauigkeitswerte - Kühleffekte tags und nachts hoch - Günstige Auswirkungen auf die lufthygienische Situation <p><i>Bewertung:</i> Als Ventilationsschneise zu empfehlen.</p> <p style="text-align: center;">Fließ- und Stillgewässer</p> <ul style="list-style-type: none"> - Geringe Rauigkeitswerte - Kühleffekte tags und nachts mäßig - Günstige Auswirkung auf die lufthygienische Situation <p><i>Bewertung:</i> Als Ventilationsschneise zu empfehlen.</p>

Es müssen daher Verbesserungsvorhaben entwickelt und angewandt werden, die flächenneutral direkt an einer möglichen Quelle ansetzen. Insbesondere in Hinblick auf die ungünstige lufthygienische Situation in Städten kommt diesem Ansatz durch Reduzierung der Spurenstoffemissionen der Quellgruppen Kfz-Verkehr und Hausbrand große Bedeutung zu.

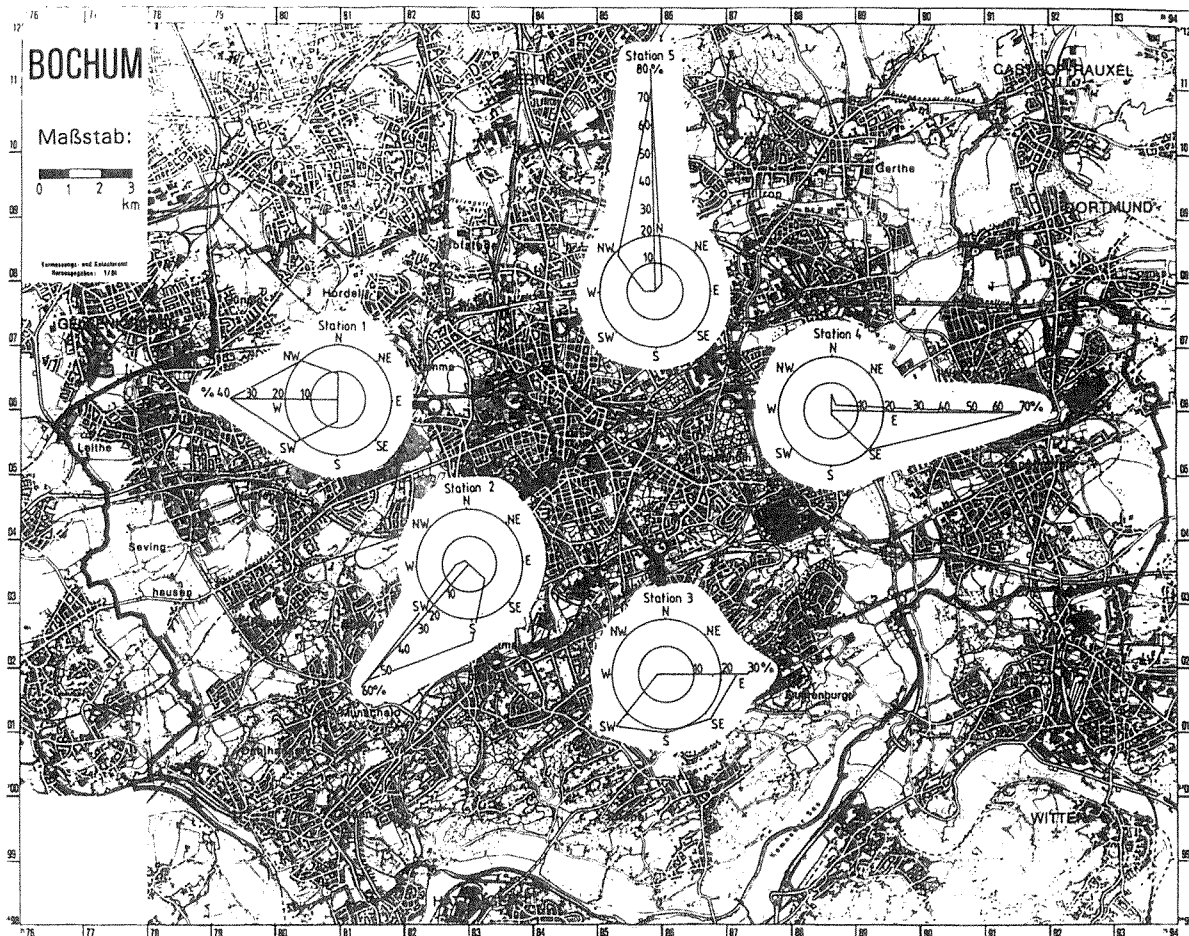


Abb. 2: Windrichtungsverteilung von Flurwinden, die zwischen Mai 1987 und August 1988 an den jeweiligen Stationen in Bochum gemessen wurden. Datenbasis: 1200 Flurwindstunden. Nach /17/.

4. Maßnahmen zur Minimierung von kfz-bedingter Emissionen

Das Personenverkehrsaufkommen innerhalb Deutschlands liegt derzeit bei etwa 44 km pro Einwohner und Tag. Davon werden zu 81 % Pkw beansprucht, wogegen lediglich 10 % der Bevölkerung den öffentlichen Nahverkehr benutzen. Der Güterverkehr wird zu 51 % über Lkw abgewickelt gegenüber einem 30 %igen Anteil, der mit der Bahn transportiert wird /18/. Eine auf den Personenverkehr bezogene Aufteilung des Mobilitätsaufkommens ergibt einen Anteil von 20 % für den Berufs-, 4 % für den Ausbildungs- und 10 % für den Einkaufs- und Erledigungsverkehr. Ferner entfallen 13 % auf Geschäfts- und Dienstreisen sowie 52 % auf Freizeit- und Urlaubsfahrten /19/.

Da der größte Teil des Verkehrsaufkommens mit relativ kleinen Mobilitätseinheiten vorgenommen wird, kommt es zwangsläufig zu hohen Straßen- und Luftbelastungen. Tab. 2 zeigt

den prozentualen Anteil des Straßenverkehrs an den jährlichen Emissionen verschiedener Spurenstoffe für Deutschland.

Tab. 2: Emissionen in Deutschland in kt (CO ₂ in Mt). *) Gesamter Verkehr. Nach /20/.				
Stoff	Emission 1991		Anteil Straßenverkehr [%]	
	alte Länder	neue Länder	alte Länder	neue Länder
CO ₂	761	221	17,7	9,0
SO ₂	1000	3550	5,3	0,7
NO _x	2650	490	59,0	30,4
CO	7300	2700	67,8	38,2
Staub	450	1350	19,1 ^{*)}	2,2 ^{*)}
VOC	2250	740	36,9	59,2

Auch das bodennahe Auftreten sekundärer Spurenstoffe wie z. B. Ozon (O₃) wird inzwischen in Zusammenhang mit dem Kfz-Verkehr diskutiert /21/. Über die Senkung der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen hinaus ist der Reduzierung der Komponenten Stickstoffdioxid, Benzol und Ruß nach der 23. BImSchV /3/ besonderes Augenmerk beizumessen.

Da der größte Teil des Straßenverkehrs in urban-industriellen Gebieten zu beobachten ist, deren Bebauungsstrukturen ungünstige Ausbreitungsverhältnisse der bodennah emittierten Spurenstoffe verursachen, wird deutlich, daß die lufthygienische Situation in Städten durch den Kfz-Verkehr erheblich beeinträchtigt wird.

Die Emissionsquellstärke des Straßenverkehrs hängt vom Schadstoffausstoß der einzelnen Kraftfahrzeuge, von deren Fahrverhalten und von der Verkehrsstärke auf der Straße, d. h. von der Anzahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit, ab. Daraus lassen sich verschiedene verkehrsemissionsmindernde Handlungskonzepte ableiten, zu denen die Weiterentwicklung emissionsarmer Autos, die Erstellung von Verkehrsregulierungs- und -minderungsplänen sowie monetäre Maßnahmen zählen.

Verstärkter Einsatz emissionsarmer Fahrzeuge

Durch ordnungspolitische Vorgaben, wie z. B. die Einführung des Benzin-Blei-Gesetzes und die Katalysatortechnik, wurden in den letzten Jahren nachweisbare Erfolge bei der Verminderung kfz-verursachter Emissionen erzielt.

Die industrielle Entwicklung von kraftstoffsparenden Fahrzeugen über verbesserte Motorentechniken, niedrigere c_w-Werte bei und Gewichtsabnahme von Autos sowie geringere Rollwiderstände der Reifen werden dagegen durch mittlerweile zusätzlich eingebaute Sicherheits- und Komfort-Aggregate teilweise wieder kompensiert.

Ein in Deutschland noch in der Probephase befindliches Instrument zur Minimierung der bodennah emittierten Kfz-Emissionen stellt das Elektrofahrzeug dar. Trotz der bislang maximalen Reichweite einer Batteriefüllung von unter 100 km wäre das Elektroauto schon heute für den Stadtzyklus zu empfehlen. Ein Vergleich der herstellungs- und betriebsbedingten Emissionen zwischen benzin-, diesel-, gas- und elektrisch-betriebenen Fahrzeugen zeigt, daß der Energieverbrauch zur Herstellung dieser Fahrzeuge beim Elektrofahrzeug am höchsten ist, die fahrbetriebsverursachten, direkt am Fahrzeug gemessenen Emissionen aber bekanntermaßen gen Null tendieren. Für den urbanen Raum könnten daraus Vorteile entstehen. In Hinblick auf eine gesamtbetrachtende Ökobilanz würde das Elektrofahrzeug nach heutigen Maßstäben jedoch ein ungünstiges Resultat erzielen.

Verkehrsmanagement

Der innerstädtische Straßenverkehr zeichnet sich durch ein Fahrmuster aus, das im Gegensatz zu Landstraßen- und Autobahnfahrten einen kontinuierlichen Verkehrsfluß mit vergleichsweise geringen Spurenstoffemissionen weitgehend ausschließt. Daher sollte ein verbessertes Verkehrsmanagement insbesondere auf eine Steigerung des Verkehrsflusses unter Vermeidung von Staus, Umwegfahrten und Parkplatzsuchverkehr auch unter Einbindung weiterer Mobilitätsmöglichkeiten ausgerichtet sein.

Neben straßenbaulichen Maßnahmen können Informations- und Leitsysteme, die über Fahrspurbeeinflussungs- und Wechselverkehrsschilderanlagen bis hin zu elektronischen Zielführungssystemen eine breite Palette an verkehrssteuernden Elementen bilden, dazu beitragen, den innerstädtischen Straßenverkehr flüssiger und damit weniger schadstoffintensiv zu gestalten. Da mittlerweile rund 40 % des innerstädtischen Fahrzeugaufkommens von Parkplatzsuchenden verursacht werden, besteht hier ein besonders dringlicher Handlungsbedarf, der über Parkleitsysteme hinaus auch mit platzsparenden automatischen Parksyste-men geregelt werden kann.

Die zur Verbesserung des Stadtklimas geeigneten Stadtteil- oder Innenstadtsperren für den Kfz-Verkehr sind als innerstädtisches Verkehrsminderungsprinzip bereits mehrfach - allerdings überwiegend gegen den Willen der Bevölkerung - angewandt worden. Damit durch Flächenstillegungen Verkehrsprobleme nicht in benachbarte Stadtteile verlagert werden, sind diese Maßnahmen nur unter Einbeziehung anderer Personenbeförderungsmittel durchführbar. Dabei spielt der Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs (ÖPNV) durch ein erweitertes Streckennetz und höhere Taktfrequenzen des Fahrbetriebes eine entscheidende Rolle. Das Hauptproblem der Realisierung eines erweiterten und damit

"kundenfreundlicheren" Straßen-, Untergrundbahn- und Busverkehrs besteht in der Abhängigkeit des Angebotes von der Nachfrage. Hier sind vermehrte Subventionen aus Landes- und Bundesmitteln gefordert, um den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs ohne die erst nach Fertigstellung einer verbesserten Infrastruktur des ÖPNV zu erwartenden Mehreinnahmen aus einem gesteigerten Fahrgastaufkommen vornehmen zu können /22/.

Anreize zur stärkeren Frequentierung des ÖPNV bzw. der Bereitschaftsteigerung bei den Verkehrsteilnehmern andere Fortbewegungsarten zu akzeptieren, können über infrastrukturelle Maßnahmen hinaus durch Modifikationen im Verbraucherverhalten erzielt werden. Es bestehen praktikable Möglichkeiten, bei Verhaltensänderungen der Verkehrsteilnehmer durch sinnvolle Nutzungskombinationen von motorisierten privaten und öffentlichen sowie nicht motorisierten Verkehrsmitteln den Pkw-Verkehr zu reduzieren. Untersuchungen, die in der Stadt Bern (CH) durchgeführt wurden, zeigen, daß eine Erhöhung des Besetzungsgrades im Pendlerverkehr, der zeitweisen Substitution des Autos bei Kurzstrecken von ein bis drei Kilometern Länge durch Fußgänge, Fahrradfahrten und der Benutzung des ÖPNV Verminderungen des privaten motorisierten Straßenverkehrs um bis zu 15 % bewirken können /23/. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, daß der Mehrverbrauch durch Kaltstarts auf den ersten zwei Kilometern einer zurückgelegten Strecke etwa 5 % des gesamten jährlichen Pkw-Kraftstoffverbrauchs ausmacht /19/. Vorteilhaft gegenüber gesetzlichen Reglementierungen erscheint die bei der flexiblen Nutzungskombination bestehende Entscheidungsfreiheit der Verkehrsteilnehmer, wann auf welche Mobilitätsmöglichkeit zurückgegriffen wird.

Monetäre Maßnahmen

Eine weitere Lösungsmöglichkeit zur Verkehrsreduzierung besteht in der Verteuerung des Autofahrens. In diesem Zusammenhang werden die Umstellung der bisher hubraumbezogenen Kfz-Steuer auf eine neue Bemessungsgrundlage, die sich u. a. am Kraftstoffverbrauch und an den Abgasemissionen bemißt, sowie eine Erhöhung der Mineralölsteuer erörtert. Ausgehend von der These, daß eine effiziente Verbesserung der urbanen Verkehrssituation nur von einer Senkung der Nachfrage über höhere Kraftstoffpreise zu erwarten ist, sollten aus diesen Maßnahmen resultierende Mehreinnahmen zweckgebunden für verbesserte Alternativangebote der Verkehrsgestaltung zur Verfügung gestellt werden /24/.

Lkw-Verkehr und Industriestandorte

Die dargestellten Lösungsansätze zur Verminderung verkehrsbedingter Emissionen in städtischen Agglomerationsgebieten beziehen sich überwiegend auf den Pkw-Verkehr. Auf die

Reduzierung des Lkw-bedingten Schadstoffausstoßes sind jedoch Aspekte wie emissionsmindernde Maßnahmen durch verbesserte Motorentechnik, optimale Auslastung der Fahrzeuge, monetäre Steuerungselemente und Leitsysteme für den Straßenverkehr übertragbar. Die Ausweisung von Gebieten mit gewerblicher und industrieller Nutzung an den Stadtrand sollte stärker als bisher berücksichtigt werden, um über Lkw-Leitsysteme den betreffenden Güterverkehr um eine Stadt herumleiten zu können. Aufgrund der in Deutschland selten auftretenden aber durch relativ hohe Windgeschwindigkeiten gekennzeichneten nordwestlichen Strömungsrichtungen ist eine Ausweisung von Gewerbe- und Industriegebieten an den nordwestlichen Stadtrand urban-industrieller Ballungsgebiete in Hinblick auf die Ausbreitung produktionsbedingter Emissionen zu empfehlen /25/.

Notwendigkeit von Maßnahmenkatalogen zur Minimierung des Kfz-Verkehrs

Die aufgeführten Beispiele verdeutlichen, daß das Potential zur Dämpfung des Verkehrsaufkommens in Städten grundsätzlich gegeben ist. Allerdings gilt es als erwiesen, daß die Anwendung von Einzelmaßnahmen keine durchgreifenden Erfolge erbringt. Werden diese zu Szenarien zusammengefaßt und fallweise differenziert angewandt, können jedoch die angestrebten Ziele einer Reduzierung des kfz-bedingten Schadstoffausstoßes verifiziert werden. PROGNOSE /26/ hat 22 Maßnahmen - darunter Verkehrsabgaben sowie Steuern, Tempolimits und Geschwindigkeitskontrollen, Parkraumbewirtschaftung, ÖPNV-Förderung, P+R-Ausbau, Radwegbau, Verkehrsflußsteuerung, Schulung und Verhaltensänderungen - auf ihren Beitrag zur CO₂-Reduzierung untersucht (Tab. 3).

Tab. 3: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen aus dem Kfz-Verkehr. Nach /26/, verändert.				
Zeitraum: 1987 - 2005	Straßenverkehr in Mio. t/a	anderer Verkehr in Mio. t/a	Verkehr insgesamt in Mio. t/a	Veränderung in %
1987	119,0	13,1	132,2	
2005 Trend	137,6	15,3	153,0	+ 15,8
Szenario R	56,9	25,8	82,7	- 37,4
Szenario P	77,4	20,8	98,2	- 25,7
Szenario A	104,5	18,2	122,8	- 7,1

Szenario R (Politik des Regelns) enthält sämtliche Maßnahmen, Szenario P (Politik der preislichen Anreize) 14 Maßnahmen, auch unter Verwendung von Verbrauchsgrenzwerten und Erhöhung der Mineralölsteuer, und Szenario A (Politik der Anreize durch Angebote, Appelle und Aufklärung) umfaßt neun Maßnahmen dieser Kategorie. Gegenüber einer auf der Basis des bisherigen Maßnahmenstandards errechneten CO₂-Zunahme um 15,8 % inner-

halb des Zeitraumes 1987 bis 2005 wird durch Szenario R eine Verringerung um mehr als 37 % erreicht. Dieser gegenüber Szenario A erheblich größere Effekt wird vor allem durch die Einbeziehung von Grenzwertfestlegungen, Steuererhöhungen und Verkehrsabgaben erzielt.

Deutlich wird, daß lediglich Maßnahmenbündel mit weit gefaßten Szenarien, die auch politisch schwer durchsetzbare Reglementierungen enthalten, nachhaltige Auswirkungen auf die lufthygienische Situation in Städten aufweisen können /22/.

5. Reduzierung des Hausbrandes durch klimagerechtes Bauen

Ein Gebäudebetrieb verursacht durch Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten über ein Drittel des Primärenergiebedarfs der westlichen Industrieländer, mit daraus resultierenden hohen Emissionen insbesondere an Kohlendioxid. Der durch den Gebäudebetrieb verursachte CO₂-Ausstoß Deutschlands beruht mit rund 30 % auf dem Hausbrand, der darüber hinaus als bodennahe Quelle anzusehen ist. Daher ist es ein wichtiges Ziel zukünftiger Stadtplanungen, Energie in diesem Bereich einzusparen. Die Erfüllung dieses Zieles ist um so dringlicher, als die ENQUETE-KOMMISSION des deutschen Bundestages "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" im Jahre 1990 beschlossen hat, die energiebedingten CO₂-Emissionen der bundesdeutschen Haushalte zum Schutz des globalen Klimas bis zum Jahre 2010 um rund ein Viertel zu senken /27/.

Folglich sind mit vergleichbarem Kostenaufwand Wohnräume zu schaffen, für die unter Wahrung des bisherigen Standards wesentlich weniger Energie, insbesondere für Heizzwecke aufgewandt wird.

Hierzu bedarf es eines Maßnahmenbündels, das die Standortwahl von Neubaugebieten, die Gebäudestellung, -form und -anordnung sowie die Gebäudekonzeption wesentlich stärker nach klimatisch-energetischen Kriterien ausrichtet, als das bisher geschehen ist.

Standortwahl

Die erste energierelevante Entscheidung vor dem Neubau eines Gebäudes oder einer Siedlung ist die Wahl des Standortes, da verschiedene topographische Lagen unterschiedliche geländeklimatische Bedingungen aufweisen können. Interpretationen von Relief- und Thermalkarten sowie klimatologische Messungen können hierzu dezidierte Angaben machen. Darüber hinaus ist es möglich, mit Hilfe von statistischen Methoden und digitalen Geländemodellen die Abhängigkeit klimatologischer Elemente wie Strahlung, Temperatur und Windfeld von den klimatischen Faktoren Geländehöhe, Bodenbedeckung und Relief für ei-

nen Standort zu bestimmen. Daraus lassen sich Klimaeignungskarten in Maßstäben zwischen 1:25.000 und 1:200.000 für den lokalen bzw. regionalen Planbereich ableiten. So kann vermieden werden, daß Neubaugebiete in klimatischen Ungunsthöhen ausgewiesen werden, die durch eingeschränkte Strahlungsverhältnisse, Windoffenheit sowie Kaltluft- oder Inversionsanfälligkeit den Heizenergiebedarf erhöhen /28/.

Neben der Abklärung eines günstigen Topoklimas erscheint bei der Grundstückwahl die Überprüfung vorhandener nutzbarer Wärmequellen sinnvoll. Es sollte nach Umweltwärme und Abwärme unterschieden werden. Nutzbare Umweltwärmequellen sind u. a. Erdreich, Grundwasser und Oberflächenwasser, als Abwärmequellen kommen prinzipiell industrielle Abwärme, Abwasser und Kraftwerkswärme in Frage.

Gebäudeausrichtung

Eine weitere Maßnahme, den Energiebedarf einer Siedlungsstruktur zu senken, besteht darin, eine größtmögliche Besonnung der Gebäude zu gewährleisten. Das kann durch eine Ausrichtung der Gebäudelängsachse vorwiegend in Ost-West-Richtung sowie durch die Sicherstellung genügend großer Abstände zwischen den Gebäuden erfolgen, um bei tiefstehender Sonne im Winter eine Besonnung der Südfassaden zu erzielen. Ferner ist eine Anordnung höherer Geschößbebauungen an den Gebäudenordseiten mit darin eingelassenen südlich orientierten Fenstern zur besseren Ausnutzung der Sonnenenergie zu empfehlen. Eine südorientierte Gebäudeausrichtung setzt jedoch Beschattungselemente wie z. B. Sonnenschutzfenster, Jalousien, Laubbäume etc. zur Minimierung der Einstrahlung im Sommer voraus.

Windreduzierende Maßnahmen

In windbelasteten Gebieten, wie Küsten- und Mittelgebirgslagen, stellen windreduzierende bzw. -regulierende Maßnahmen durch die Gebäudeformen und -anordnungen sowie durch Windschutzpflanzungen ein weiteres Energieeinsparungspotential dar. Es muß jedoch untersucht werden, ob während austauscharmer Wetterlagen eine Windschutzmaßnahme einen Mindestluftwechsel innerhalb einer Siedlung nicht unterbindet /29/.

Eine Gebäudeform, welche dem Wind wenig Widerstand entgegensezt, ist z. B. durch tief heruntergezogene Dächer gekennzeichnet. Darüber hinaus sind Hausanordnungen in gestaffelter "Zugvogelformation", mit Nutzungen in den luvseitigen Gebäuden, die wenig Heizenergie benötigen, in windbelasteten Gebieten empfehlenswert.

Pflanzliche Windschutzeinrichtungen (Bäume, Hecken) wirken sich gegenüber Wällen oder baulichen Maßnahmen besser aus, da sie die Windstärke wegen der zusätzlich auftretenden

Verwirbelungen weitreichender verringern als es feste Hindernisse vermögen /30/. Die in Kap. 3 beschriebenen Fassaden- und Dachbegrünungen können ebenfalls den Windeinfluß auf ein Gebäude minimieren.

Generell ist darauf zu achten, daß Bepflanzungs- und Bebauungsstrukturen so angelegt werden, daß unbeabsichtigte Lücken-, Düsen- und Umlenkeffekte vermieden werden. Lösungsansätze zu diesem Problem wie auch die Eruierung von Gebäudeformen und -anordnungen, die Windeinwirkungen vermeiden helfen, können für jedes Terrain in Abhängigkeit von den lokalklimatischen Gegebenheiten durch Windkanalmodellierungen untersucht und optimiert werden /31/.

Gebäudekonzeption

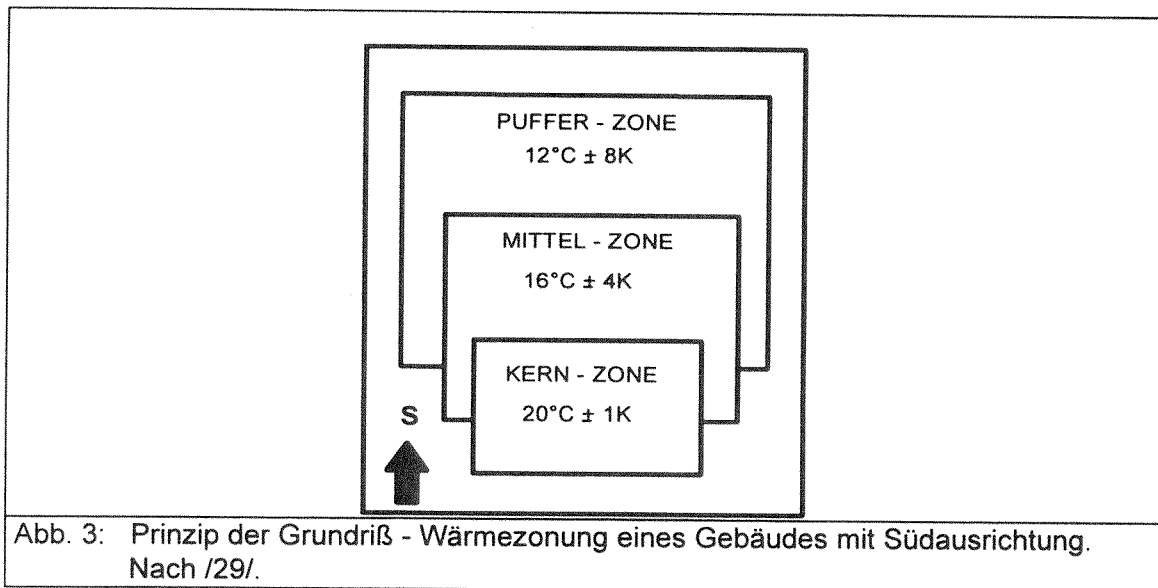
Der Energiebedarf eines Gebäudes wird durch weitere Parameter bestimmt, wozu die Gebäudeart, die Grundrißgestaltung und die Beschaffenheit der Gebäudehülle zählen /29/.

Eine kompakte Bauform mit möglichst glatten Oberflächen gilt als die energetisch günstigste Hausform. Diese kommt in einem kleinen Verhältnis der vorhandenen Transmissionsflächen zum darin enthaltenen Volumen (A/V-Verhältnis) zum Ausdruck. Unter Berücksichtigung dieses Kriteriums weist ein Einfamilienhaus gegenüber dem verdichteten Flachbau und dem mehrgeschossigen Wohnungsbau das schlechteste A/V-Verhältnis auf, wobei nicht berücksichtigt ist, daß in verdichteten Wohngebieten der Einsatz von energetisch günstigeren zentralen Versorgungseinrichtungen eher gegeben ist. Ein ungünstiges A/V-Verhältnis hat einen hohen Heizenergieaufwand zur Folge, da sich mehr Räume in Eck-, Seiten- und Dachpositionen befinden als in Innenlage. Daraus folgt, daß generell der Grundriß eines Gebäudes auch aus energetischer Sicht konzipiert werden muß.

Die thermische Behaglichkeit des Menschen wird nach FANGER /32/ durch das Aktivitätsniveau und die Bekleidung in Abhängigkeit verschiedener klimatologischer Elemente bestimmt. Dieser Ansatz kann in der Grundrißkonzeption Anwendung finden. Werden die Räume um den wärmsten und meist genutzten Teil eines Gebäudes mit abnehmendem Temperaturniveau und sinkender Benutzungsfrequenz nach außen angelegt, entsteht eine energieeinsparende Wärmezoning des Gebäudes. Diese ist durch konsequente Anordnung von Archivräumen, Korridoren, Treppenhäusern, Garagen und Wintergärten in den Puffer- und Mittelzonen der nord-, ost- und westorientierten Seiten eines Gebäudes realisierbar (Abb. 3).

Bewährte Techniken zur Heizkostenreduzierung im Gebäudebereich sind ferner der verbesserte bauliche Wärmeschutz der Gebäudehülle, bestehend aus Außenwand, Dach, Fenster

und Kellerdecke. Die 3. WÄRMESCHUTZVERORDNUNG /4/, die seit Januar 1995 Gültigkeit besitzt, gibt gegenüber früheren Grenzwerten Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Wert) für opake Baumaterialien und Fenster vor, die zur Erreichung des novellierten maximalen Heizwärmebedarfes, der je nach Gebäudeart zwischen 54 und 100 kWh/m² a Wohnfläche liegen soll, weit geringere Werte aufweisen.



Da die Wärmedurchgangskoeffizienten von modernen und gut isolierten opaken Flächen mittlerweile Werte unterhalb der neuen k-Werte (0,5 W/m² K für eine Hauswand) aufweisen, konzentriert sich das Bemühen um Energieeinsparung insbesondere auf die Fensterflächen. Sehr aufwendig produzierte Isoliergläser mit Dreifachverglasung, Edelgasfüllung und Doppelbeschichtungen aus hauchdünnem Edelmetall bzw. Metalloxid erreichen k-Werte, die kein weiteres Energieeinsparungspotential offenlassen. Daher muß die Energieeinsparung durch Fensterflächen auf die passive Nutzung von Sonnenenergie ausgerichtet sein. Das Maß, das diese passive Energiegewinnung beschreibt, ist die Gesamtenergiedurchlässigkeit der Verglasung (g-Wert).

Eine zentrale Größe bei den Berechnungsverfahren für den Gebäudebereich ist somit der Bilanz-k-Wert des Fensters $k_{eq, F}$, der sich in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung aus dem k- und g-Wert wie folgt berechnet /33/:

$$k_{eq, F} = k - S \cdot g.$$

Durch den Strahlungsgewinnfaktor S wird berücksichtigt, daß die mittlere Einstrahlung der Sonne im Süden besonders hoch, im Norden dagegen relativ gering ist, mit Werten für die Himmelsrichtungen:

$$S : \text{Nord} = 0,95; S : \text{Ost/West} = 1,65; S : \text{Süd} = 2,40 \text{ W/m}^2 \text{ K.}$$

Die Ausnutzung der passiven Sonnenenergie bei Fensterflächen hat somit neben der Güte des Materials, die Exposition der Fensterfläche und damit auch das Verhältnis Fensterfläche zu Hauswand zu berücksichtigen. Daraus folgt, daß nach Süden exponierte Fenster relativ groß und nach Norden weisende Fenster relativ klein sein sollten. Tab. 4 zeigt eine beispielhafte Energieberechnung auf der Basis der drei genannten Faktoren für ein Gebäude mit bis zu zwei Vollgeschossen, das nicht mehr als drei Wohneinheiten beinhaltet (Bauteilverfahren /4/). Danach wird ein Bilanz-k-Wert von 0,27 W/m² K erreicht, der weit unterhalb des von der neuen Wärmeschutzverordnung geforderten Wertes von 0,7 W/m² K für o. g. Gebäudekategorie liegt.

Tab. 4: Berechnung des über alle Gebäudeseiten gemittelten Bilanz-k-Wertes für ein Gebäude mit bis zu zwei Vollgeschossen und weniger als vier Wohneinheiten. S-Faktor: Strahlungsgewinnkoeffizient, abhängig von der Himmelsrichtung; k: Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters; g: Gesamtenergiedurchgang; k_{eq}, F: Bilanz-k-Wert der Fenster. Nach /33/.

Himmelsrichtung	Fensterfläche		S-Faktor	Fensterflächenanteil · (k - S · g)	
	m ²	Anteil		k _{eq} , F	
Norden	5	0,125	0,95	0,125 · 0,92 =	0,12
Osten	10	0,250	1,65	0,250 · 0,41 =	0,10
Westen	10	0,250	1,65	0,250 · 0,41 =	0,10
Süden	15	0,375	2,40	0,375 · - 0,13 =	- 0,05
					(W/m ² K) 0,27

Würde der gesamte Gebäudebestand in den neuen Bundesländern z. B. an die Vorschriften der 3. WÄRMESCHUTZVERORDNUNG /4/ angepaßt, könnte der Endenergieverbrauch für Raumwärmezwecke in Ostdeutschland um etwa 14 % gesenkt werden /34/.

Die Reduzierung des Energieaufwandes für die Gebäudeheizung kann darüber hinaus durch zusätzlichen Einsatz wärmespeichernden Materials und energieeinsparender Heizanlagen erfolgen. In Zusammenhang mit einer kontrollierten Wohnungslüftung einschließlich inte-

grierter Wärmerückgewinnung und elektronischer Regelungssysteme sowie einer erweiterten Nutzung der Solartechnik würde ein Gebäude insgesamt als ein im Energieaustausch mit der Umwelt befindliches System charakterisiert. Dieser Ansatz liegt jedoch lediglich den bislang auf Einzelobjekte beschränkten Niedrigenergiehäusern zugrunde, bietet letztendlich aber den effektivsten Weg, urbane Luftbelastungen durch den Gebäudebetrieb merklich zu reduzieren /35/.

Obwohl die erforderlichen Techniken für energiesparendes Bauen beherrschbar und z. T. gesetzlich verankert sind, befindet sich deren konsequente Anwendung erst in den Anfängen. Daher kommt den Bauaufsichtsbehörden die Aufgabe zu, die Einhaltung der Verordnungen zur Energieeinsparung im Gebäudebereich wirksamer als bisher zu überwachen. Der Bekanntheitsgrad der gesetzlich geforderten Auflagen, vor allem jedoch die Erkenntnis der Notwendigkeit und Möglichkeit von Energieeinsparungen durch klimagerechtes Bauen ist innerhalb der Bevölkerung bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt offensichtlich nicht in ausreichendem Maße gegeben. Daher wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß der Energiebedarf für den Betrieb von Gebäuden für Heiz- und Lüftungszwecke im Winter und gegebenenfalls für eine Klimatisierung im Sommer über die gesamte Nutzungsdauer eines Gebäudes mindestens 20mal so hoch ist wie derjenige zur Errichtung eines Hauses /36/.

6. Ausblick

Nach den in diesem Artikel zusammenfassend dargestellten Einflußmöglichkeiten auf das Stadtklima erhebt sich die Frage nach einer Kosten-Nutzen-Bilanz. Vor allem eine Monetarisierung der zur Erreichung einer Verbesserung des Stadtklimas notwendigen Maßnahmen würde den Rahmen dieses Artikels sprengen. Es gilt jedoch als sicher, daß ohne pekuniäre Leistungen des Einzelnen dem gegenwärtigen Trend zu einer auf Fehlentwicklungen basierenden belasteten Umweltsituation nicht mehr gegenzusteuern ist. Darüber hinaus muß klargestellt werden, daß sich der heutige - mittlerweile als selbstverständlich erachtete Lebensstandard - zu Gunsten einer klimagerechten Stadt reduzieren wird.

Die Bemühungen, das zukünftige Stadtklima im Sinne einer verträglichen urbanen Umwelt zu gestalten, kann nur im Zusammenspiel zwischen technischer Innovation, ökonomischem Geschick, politischem Verantwortungsbewußtsein und der Bereitschaft des Einzelnen, seine ethischen Vorstellungen auf einen den ökologischen Erfordernissen zugeschnittenen Rahmen anzupassen, erfolgen.

7. Literatur

- /1/ Baugesetzbuch (BauGB), Bundesgesetzblatt 12/86, Bonn 1986.
- /2/ Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVP), Bundesgesetzblatt 2/90, Bonn 1990.
- /3/ 23. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV), Bundesgesetzblatt 12/96, Bonn 1996.
- /4/ Wärmeschutzverordnung (3. Fassung), Bundesgesetzblatt 8/94, Bonn 1994
- /5/ Kuttler, W.: Aspekte der Angewandten Stadtklimatologie. Geowissenschaften, 14, 6, 221-228, 1996.
- /6/ Horbert, M., Kirchgeorg, A., Chronopoulous-Sereli, A., Chronopoulous, J.: Impact of green on the urban atmosphere in Athens. Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich 1988.
- /7/ Horbert, M.: Freiraumplanung in hochverdichteten älteren Wohngebieten (Berlin). In: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Hrsg.) Lufthygiene und Klima, 187-201. VDI-Verlag, Düsseldorf 1993.
- /8/ Kuttler, W.: Zum klimatischen Potential urbaner Gewässer. In: Thiesmeyer, B., Schuhmacher, H. (Hrsg.): Urbane Gewässer, 380-396. Essen 1991.
- /9/ Pranzas, N.: Methode zur flächenhaften Bestimmung von Entsiegelungspotentialen in Wohngebieten. Naturschutz und Landschaftsplanung, 26, (3), 1994.
- /10/ Minke, G.: Fassaden- und Dachbegrünung - Ein ökonomischer Beitrag zum ökologischen Bauen. In: Schwarz, H. (Hrsg.): Grünes Bauen, 149-173, 1992.
- /11/ King, E.: Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 130, Bd. 17. Offenbach a. M. 1973.
- /12/ Hauf, T., Witte, N.: Fallstudie eines nächtlichen Windsystems. Meteorologische Rundschau, 38, 33-42, 1985.
- /13/ Barlag, A.-B.: Planungsrelevante Klimaanalyse einer Industriestadt in Tallage. Magdeburg: Westarp, Essener Ökologische Schriften, 1, 1993.
- /14/ Barlag, A.-B., Kuttler, W.: The significance of country breezes for urban planning. Energy and Buildings, 15/16, 291-297, 1991.
- /15/ Kuttler, W., Barlag, A.-B., Roßmann, F.: Study of thermal structure of a town in a narrow valley. Atmospheric Environment, 30, 3, 365-378, 1996.
- /16/ Mayer, H., Beckröge, W., Matzarakis, A.: Bestimmung von klimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-Report, 5/94, 265-268, 1994.
- /17/ Kuttler, W.: Planungsorientierte Stadtklimatologie. Geogr. Rundschau 45 (2), 95-106, 1993.
- /18/ Heinloth, K.: Energie und Umwelt - Klimaverträgliche Nutzung von Energie. 2. Aufl., Teubner Verlag, Zürich 1996.
- /19/ Helling, J.: Reduktion von Energiebedarf und CO₂-Emissionen beim PKW-Verkehr. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 42. Jg., 3, 126-133, 1992.

- /20/ Pfeffer, H.-U., Ellermann, K., Friesel, J., Borowiak, A.: Immissionsmessungen an innerstädtischen Verkehrsbrennpunkten. In: Schriftenreihe der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, 23, 10-27, Düsseldorf 1995.
- /21/ Kuttler, W., Straßburger, A.: Zur Frage der Luftqualität innerstädtischer Grünflächen. Ann. d. Meteorol. 33, 8-15, 1997.
- /22/ Topp, H.: Verkehrskonzepte für Stadt und Umland zwischen Krisenmanagement und Zukunftsgestaltung. Raumforschung und Raumordnung, 50. Jg., 1-2, 15-23, 1992.
- /23/ Kobi, S., Künzler, P., Dietiker, J.: Das Berner Modell: Die angebotsorientierte Verkehrsplanung als Instrument zur Reduktion der Umweltbelastungen durch den Verkehr. In: VDI-Berichte 1228, 195-215, 1995.
- /24/ Schindler, V.: Auswirkungen von Kraftstoffpreiserhöhungen auf den PKW-Verkehr. Wirtschaftsdienst 10/91, 128-532, 1991.
- /25/ Schwegler, H.: Die meteorologische Lage Münchens im Hinblick auf die Verunreinigung der Atemluft. Meteorol. Rundschau, 20, 6, 166-168, 1967.
- /26/ Prognos AG: Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der verkehrlichen CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2005. Schlußbericht zum Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, 1991.
- /27/ Enquete-Kommission: Schutz der Erde, eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik. 3. Bericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages, Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre, Bonn, 1990.
- /28/ Gerth, W.-P.: Klimatische Wechselwirkungen in der Raumplanung bei Nutzungsänderungen. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bd. 171, Offenbach a. M. 1986.
- /29/ Dütz, A., Martin, H.: Energie und Stadtplanung. Leitfaden für Architekten, Planer und Kommunalpolitiker. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1992.
- /30/ Beckmann, R.: Die Hausschutzhecken im Monschauer Land unter besonderer Berücksichtigung ihrer klimatischen Auswirkungen. In: Arbeiten zur rheinischen Landeskunde, 49, Bonn 1982.
- /31/ Plate, E. J.: Der Einsatz des Windkanals bei der Lösung stadtklimatischer Probleme. Geowissenschaften, 14, 6, 240-244, 1996.
- /32/ Fanger, P. O.: Thermal comfort. New York, Mc Graw Hill 1972.
- /33/ Flachglas AG (Hrsg.): Die neue Wärmeschutzverordnung, Gelsenkirchen 1994.
- /34/ Horn, M.: Umstrukturierung der Raumwärmeversorgung in den neuen Bundesländern. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 42. Jg., 3, 138-144, 1992.
- /35/ Biasin, K., Dietrich, B.: Niedrigenergiehaus - Energetische und gestalterische Aspekte. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 42. Jg., 11, 730-740, 1992.
- /36/ Brandt, J., Moritz, H.: Bauteile - Anforderungen und Eigenschaften. Beiträge zum gesunden Wohnen, Bundesverband der deutschen Zementindustrie e. V. (Hrsg.), 3. Aufl., 60-79, 1992.