

SONDERDRUCK AUS:

Herausgeber:

Jose L. Lozán • Hartmut Graß! • Peter Hupfer

Warnsignal KLIMA

Wissenschaftliche Fakten

Mit 195 Abbildungen, 46 Tabellen und 10 Tafeln

In Kooperation mit

: : ;

Wissenschaftliche Auswertungen

1998

Veränderungen des Stadtklimas

WILHELM KUTTLER

CHANGES IN THE URBAN CLIMATE: The paper investigates the consequences for urban climates of an assumed increase of 2 °C in the temperature of the earth's atmosphere by the end of the 21st Century. Following a discussion of the properties and main features of urban climates, the expected changes in terms of thermal conditions and air hygiene are presented. With reference to conditions in central Europe, it is expected, on the basis of model calculations, that the number of days with heat load in the summer will increase, while there will be a decrease of cold load days in the winter. In cities where the winter is the determining factor, power consumption will probably fall. There will be an increase in ozone pollution.

Die Verstädterung ist ein Prozess, der weltweit zu beobachten ist. Er zeichnet sich durch hohe und weiter zunehmende Wachstumsraten der Stadtbevölkerung, insbesondere in den Entwicklungsländern, aus. Für das 21. Jh. wird prognostiziert, daß mehr als 60% der Weltbevölkerung in Städten, davon in 27 Megastädten mit jeweils mehr als 10 Mio. Einwohnern, leben wird.

Die Urbanisierung verursacht massive ökologische Veränderungen innerhalb der Lebensumwelt des Menschen, vor allem in klimatischer und lufthygienischer Hinsicht.

Im vorliegenden Beitrag wird der Frage nachgegangen, inwiefern sich eine globale Erwärmung der Erdatmosphäre auf die stadtklimatischen und lufthygienischen Verhältnisse auswirken kann. Vor diesem Hintergrund werden einige grundsätzlich zu erwartende Modifikationen exemplarisch diskutiert.

Eigenschaften des Urbanen Klimas

Das Stadtklima stellt eine anthropogene Klimabeeinflussung dar. Diese tritt global in urban-industriellen Ballungsräumen auf. Eingebettet in die verschiedenen makroklimatischen Verhältnisse lassen sich allerdings graduelle Unterschiede in der klimatischen Ausprägung einzelner Städte erkennen. Aufgrund der Emission langlebiger atmosphärischer Spurenstoffe in den Ballungsräumen erfolgt jedoch über den Ferntransport auch eine globale Klimabeeinflussung.

Die Ursachen, die zur Entstehung des Stadtklimas führen, sind im wesentlichen drei Einflußgrößen zuzuordnen: Erstens werden vegetationsbedeckte Flächen reduziert, zweitens werden diese ursprünglich natürlichen Bodenoberflächen durch überwiegend künstliche Materialien in versiegelte Oberflächen mit einem stark strukturierten Stadtkörper umgewandelt und drittens stellen zahlreiche technische Einrichtungen Quellen thermischer und luftverunreinigender Emissionen dar. Die genannten Faktoren verändern die Strahlungs- und Energiebilanz sowie Advektion und Diffusion und modifizieren dadurch das Klima der Städte im Vergleich

zum Umland. Hieraus resultieren die in Tab. 3.35-1 exemplarisch für eine Millionenstadt in den mittleren Breiten zusammengestellten stadtklimatischen Charakteristika.

Der klimatisch auffälligste und am besten untersuchte Effekt einer Stadtlandschaft ist deren Überwärmung im Vergleich zu ihrem unbebauten Umland. Die städtische Überwärmung ist auf die unterschiedlich starke Ausprägung verschiedener Glieder der Strahlungs- und Energiebilanz sowie auf die zusätzliche Freisetzung »anthropogener Wärme« - verursacht durch Hausbrand, Industrie und Kraftfahrzeuge - zurückzuführen. Im Jahresdurchschnitt werden positive Temperaturanomalien von 1-2 °C, in Einzelfällen durchaus auch bis zu 10 °C erreicht. Die räumliche Verbreitung der Überwärmung ist im allgemeinen an die des bebauten Untergrundes gekoppelt. Allerdings kann über lokal auftretende und durch den Temperaturgegensatz zwischen Stadt und Umland verursachte Luftbewegungen Kaltluft von Umlandfreiflächen über Schneisen in einen Stadtkörper gelangen und zu einer Modifikation der Wärmeinsel führen. Ein derartiges Windsystem, das wetterlagenabhängig und damit gelegentlich auftritt, wird Flurwind genannt. Flurwinde können in bioklimatischer Hinsicht unter bestimmten Voraussetzungen dazu beitragen, die thermische Belastung zu mindern und die Luftqualität zu verbessern. Der Grad der städtischen Überwärmung ist neben der Zufuhr anthropogener Abwärme von bebauungsbedingten Faktoren (Horizonteinschränkung, Versiegelungsgrad) und meteorologischen Faktoren (Wolkenbedeckungsgrad, Windgeschwindigkeit) abhängig. Über die Größe einer Stadt, ausgedrückt durch deren Einwohnerzahl, läßt sich im allgemeinen der Wärmeüberschuß ableiten. Letzterer ist in der Regel positiv mit der Einwohnerzahl korreliert (KUTTLER 1997).

Eine weitere Besonderheit des Stadtklimas ist die Luftverschmutzung. Hier lassen sich grob differenzierend zwei Typen unterscheiden: Städte, deren Luftqualität im wesentlichen durch Hausbrand- und

Industrieemissionen, d.h. durch Staub, Ruß und SO₂, geprägt sind, sowie Ballungsräume, deren Luftverschmutzung überwiegend durch kraftfahrzeugbedingte Emissionen - wie CO, NO_x, AVOC und deren Folgeprodukte PAN und Ozon - bestimmt werden. Gegenwärtig dominiert in den osteuropäischen, vielen fernöstlichen und afrikanischen Ballungsräumen eher der erste Typ, in den westlichen Industrieländern hingegen der zweitgenannte Luftverschmutzungstyp. Ein Beispiel der Immissionssituation einer westeuropäischen Großstadt, aufgeschlüsselt nach verschiedenen Flächennutzungstypen, zeigt *Abb. 3.35-1*.

Potentielle Auswirkungen globaler Klimaveränderungen auf städtische Ballungsräume

Vor dem Hintergrund einer im 21. Jh. wahrscheinlichen Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration wird für den europäischen Kontinent davon ausgegangen, daß es zu einer durchschnittlichen Erwärmung von etwa 2 °C gegenüber dem Jahr 1985 kommt (IPCC 1996b). Grundlage dieser Aussage sind numerische Modellberechnungen, die je nach verwendeten Szenarien zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (vgl. Kap. 3.4). In diesem Beitrag wird weder die Validität der Eingangsdaten noch die Unsicherheit der Ergebnisse diskutiert. Die o.g. Prognose wird für die nachfolgenden Betrachtungen als gegeben hingenommen. Grundsätzlich wird ferner davon ausgegangen, daß sich weder direkt noch indirekt wirksame werdende stadtbestimmende Größen innerhalb des Prognosezeitraumes maßgeblich verändern werden. Der gegenwärtige Betrachtungszustand wird sozusagen »eingefroren«; als einzige Variable wird die globale Temperaturerhöhung der Atmosphäre in ihrer Auswirkung auf das Stadtklima zugelassen.

Thermisches Milieu und bodennahe Austauschverhältnisse

Wie bereits dargelegt, wird eine Stadt in klimatischer Hinsicht im wesentlichen durch die thermischen Verhältnisse und die Veränderung des Windfeldes geprägt. Diese wirken sich nicht nur auf das Bioklima des Menschen aus, sondern beeinflussen auch den Energieverbrauch, die Emission anthropogener und biogener Kohlenwasserstoffe sowie die Entstehung sekundärer Luftverunreinigungen. Am Beispiel der Stadt Berlin wurden in diesem Zusammenhang die zu erwartenden thermischen Veränderungen für verschiedene klimatologische Ereignistage berechnet (*Tab. 3.35-2*). Während z.B. die Winterstrenge, dargestellt anhand der Anzahl von Frost- und Eistagen um 18 bzw. 13 Tage pro Jahr abnehmen

Tab. 3.35-1: Charakteristika des Stadtklimas einer Großstadt in den mittleren Breiten (nach LANDSBERG 1981, KUTTLER 1993, OKE 1994)

Einflußgrößen	Veränderungen gegenüber dem nicht-bebauten Umland
Strahlung	
• Globalstrahlung (horizontale Fläche)	-20%
• Gegenstrahlung	-10%
• UV-Strahlung im Winter	-70% - -90%
• im Sommer	-10% - -30%
Sonnenscheindauer	
• im Winter	-8%
• im Sommer	-10%
Fühlbarer Wärmestrom	50%
Lufttemperatur	
• Jahresmittel	-1 °C
• Winterminima	1 - 3 °C
• in Einzelfällen	bis 10 °C
Dauer der Frostperiode	- 30%
Wind	
• Geschwindigkeit	-25%
• Richtung	bis 10%
Absolute Luftfeuchtigkeit	
• tags	niedriger
• nachts	höher
Nebel	
• Großstadt	weniger
• Kleinstadt	mehr
Niederschlag	
• Regen	10% (leeseitig)
• Schnee	weniger
• Tauabsatz	-65%
Bioklima	
• Vegetationsperiode	bis zu 10 Tage länger
Luftverunreinigungen	
• CO, NO _x , AVOC ¹⁾ , PAN ²⁾	mehr weniger

¹⁾ AVOC = anthropogene Kohlenwasserstoffe

²⁾ PAN = Peroxiacetylnitrat

wird, wird es über 14 Sommertage pro Jahr mehr geben. Auch die heißen Tage werden um rund 6 Tage pro Jahr zunehmen. Eine Abnahme der Winterstrenge dürfte an eine Reduzierung des Heizenergieverbrauchs gekoppelt

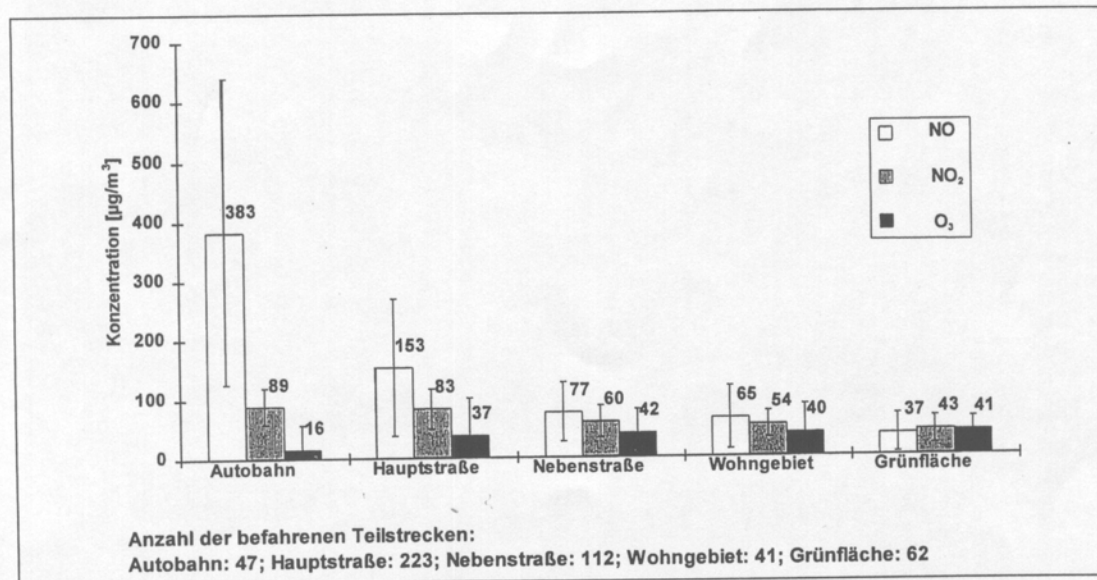


Abb. 3.35-1: NO-, NO₂- und O₃-Konzentrationsmittelwerte mit den entsprechenden Standardabweichungen aus 18 luftthygienischen Profilmeßfahrten im Stadtbereich von Essen (Meßzeitraum: Februar 1995–Juli 1997)

sein, worauf später eingegangen wird. Eine Zunahme der Sommertage könnte hingegen zu einem steigenden Energiebedarf für das Betreiben von Klimaanlage führen. Die genannten Temperaturschwellenwerte belegen somit für den positiven Bereich eine Verkürzung der Wiederholungszeiträume, für die Frost-, Eis- und extrem kalten Tage ein selteneres Auftreten. Dem während des Sommers auftretenden thermischen Diskomfort sollte frühzeitig mit Mitteln der Stadtplanung entgegengewirkt werden. So wäre z.B. dafür Sorge zu tragen, daß neben hellen Farben für Hausfassaden, Hausbegrünungen und anderen Maßnahmen bei der zukünftigen Stadtgestaltung in ausreichendem Maße das Anlegen von Belüftungsschneisen berücksichtigt wird, um den Transport von kühlerer Umlandluft (z.B. Flurwind) möglichst tief ins Stadttinnere zu ermöglichen.

Aufgrund der bebauungsbedingten Oberflächenrauigkeit treten in Stadtgebieten im allgemeinen geringere Windgeschwindigkeiten auf als im nicht bebauten Umland. Wird der bodennahe atmosphärische Austausch durch gleichzeitiges Auftreten von Windstille und einer extrem stabilen Schichtung (Temperaturinversion) behindert, kann es zu einer Erhöhung der Luftschadstoffkonzentrationen kommen. Im Zusammenhang mit einer zunehmenden globalen Erwärmung interessiert, inwiefern sich hierdurch die städtischen Austauschverhältnisse verändern. Für Berlin konnte Gross (1996) prognostizieren, daß es unter den genannten Voraussetzungen zu einem häufigeren Auftreten mächtiger Temperaturinversionen (> 300 m) kommen wird, und zwar um mehr als 20% im Vergleich zu 1985. Die Anzahl flacher bzw. gering mächtiger Inversionen dürfte

Tab. 3.35-2: Klimatologische Ereignistage für den Ballungsraum Berlin unter gegenwärtigen und veränderten Klimabedingungen, nach WAGNER 1994; aus HUPFER 1996, verändert)

EREIGNIS	Gegenwart	Modellierung nach Szenario A für Ende des 21. Jh. (ECHAM1, T21)	Änderung
	Mittlere Anzahl/Jahr		
Extrem heiße Tage $t_{\text{Max}} \geq 39 \text{ }^\circ\text{C}$	0,01	0,04	+ 0,03
Heiße Tage $t_{\text{Max}} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$	5,4	11,7	+ 6,3
Sommertage $t_{\text{Max}} \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$	27,2	41,8	+ 14,6
Frosttage $t_{\text{Min}} \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	56,6	38,6	- 18,0
Eistage $t_{\text{Max}} \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$	22,0	8,8	- 13,2
Extrem kalte Tage $t_{\text{Max}} \leq -10 \text{ }^\circ\text{C}$	0,7	0,11	- 0,59

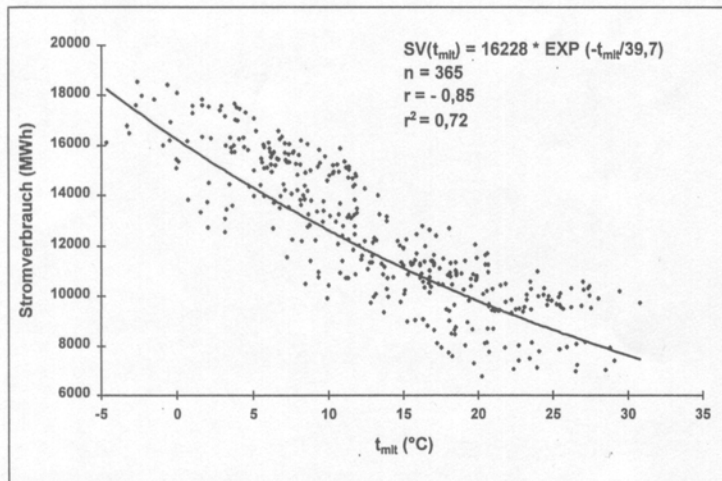


Abb. 3.35-2: Korrelation der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (t_{mitt}) mit dem durchschnittlichen täglichen Stromverbrauch (SV) für das Versorgungsgebiet der Regionalversorgung Essen: Stadtgebiete Essen, Mülheim, Heiligenhaus sowie Stadtteile Hösel und Breitscheid der Stadt Ratingen; (Quelle: RWE, Essen; pers. Mitt. 1997)

nach den vorliegenden Modellaussagen abnehmen. Als Ursache wird eine Veränderung der »Luftmassencharakterisierung« angenommen. Da mächtigere Inversionen im Vergleich zu flachen Inversionen eine größere Erhaltungsneigung aufweisen, dürfte sich hierdurch das Problem der Luftverunreinigung aufgrund einer längeren Dauer derartiger Episoden verschärfen.

Energieverbrauch

Da der Energieverbrauch in hohem Maße von den klimatischen Gegebenheiten abhängt, spielt die geographische Lage eines Ballungsraumes in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Am Beispiel des Stromverbrauchs einer Großstadt in den mittleren Breiten (Essen) sowie einer Millionenstadt in den Subtropen (Los Angeles) soll hierauf näher eingegangen werden. Für Essen zeigt sich die erwartete umgekehrt proportionale Abhängigkeit des Stromverbrauchs von der Lufttemperatur (Abb. 3.35-2). Dieses ist typisch für eine Stadt mit winterbestimmenden Verbrauchswerten. Für Lufttemperaturen unter 0 °C ergeben sich bei Temperaturveränderungen um 1 °C tägliche Mehr- oder Minderverbrauchswerte von rund 400 MWh/°C. Das ist, verglichen mit hochsommerlichen Werten ($t > 25$ °C), die

nur rund 200 MWh/°C erreichen, doppelt so viel. Auskunft über den relativen Anteil des monatlichen Stromverbrauchs am Jahresverbrauch gibt Tab. 3.35-3. Unter der Voraussetzung einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 2 °C, errechnet sich ein Minderverbrauch von etwa 8% (Tab. 3.35-3), der sich ausschließlich auf die Monate des Winterhalbjahres verteilt. Für die Sommermonate lassen sich keine Unterschiede erkennen. Bei dieser Betrachtung wurde – wie eingangs erwähnt – nicht davon ausgegangen, daß sich das Verbraucherverhalten, z.B. in Hinblick auf den verstärkten Einsatz von Klimaanlage, während Hitzeperioden ändert. Die prognostizierten Minderverbräuche dürften auch zu einer Verringerung der kraftwerksseitig verursachten Emissionen, insbesondere des CO₂, beitragen.

Im Vergleich zu den vorgenannten Verhältnissen ist für westlich geprägte Ballungsräume in den Subtropen davon auszugehen, daß ansteigende Temperaturen höheren Stromverbrauch nachschieben werden. Da der winterliche Energieeinsatz hier nur eine untergeordnete Rolle spielt, stellt der verstärkte Verbrauch für die Raumkühlung eine wichtige Steuerungsgröße dar. Am Beispiel des werktäglichen Stromverbrauchs für Los Angeles konnte OKE (1994) darlegen, daß bei Temperaturen zwischen 15 °C und 20 °C der Stromverbrauch annä-

Tab. 3.35-3: Relativer Anteil des monatlichen Stromverbrauchs am Jahresverbrauch der Stadt Essen¹⁾ unter gegenwärtigen (1995, (a)) und veränderten (b) Klimabedingungen [1995: 4 523 GWh²⁾ = 100%³⁾]

Monat	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Jahr
(a)	11	9	10	8	7	7	6	6	7	8	10	11	100
(b)	9	8	9	8	7	7	6	6	7	7	8	10	92
(b)-(a)	-2	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-1	-8

¹⁾ Versorgungsgebiet der Regionalversorgung Essen: Stadtgebiete Essen, Mülheim, Heiligenhaus sowie Stadtteile Hösel und Breitscheid der Stadt Ratingen; (Quelle: RWE, Essen; pers. Mitt. 1997)

²⁾ GWh = Gigawattstunden

³⁾ Werte gerundet

hernd gleich bleibt, während er im Temperaturbereich 20–25 °C – bezogen auf den Ausgangswert – jedoch um rund ein Drittel ansteigt. Der höhere Verbrauch bedingt neben einer zusätzlichen städtischen Überwärmung eine stärkere Luftverschmutzung und verringert die für die Energiebereitstellung notwendigen Ressourcen.

Luftqualität

Da die Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen im allgemeinen bei höheren Temperaturen zunimmt, wird eine globale Erwärmung das Emissions-, Transmissions- und Immissionsverhalten atmosphärischer Spurenstoffe und damit die städtische Luftqualität beeinflussen. So ist z.B. davon auszugehen, daß insbesondere anthropogene und biogene flüchtige Kohlenwasserstoffe (AVOC, BVOC), die eine maßgebliche Rolle bei der Produktion troposphärischen Ozons spielen, verstärkt emittiert werden. Zu den bekanntesten im städtischen Bereich auftretenden AVOC zählen Benzol, Toluol und Xylol (BTX), die überwiegend durch den Kfz-Verkehr freigesetzt werden. Allein die auf der Zunahme von Verdampfungsverlusten beruhenden Benzolemissionen, die durch Leckagen in Raffinerien, bei der Herstellung von Benzin, durch die Betankung sowie durch »Tankatmung« und »Abstellverluste« von Kraftfahrzeugen entstehen, stellen neben der Abgasfreisetzung durch die Verbrennung eine wichtige Emissionsgröße dar. Darüber hinaus muß nach den vorliegenden Prognosen der Automobilindustrie bereits jetzt davon ausgegangen werden, daß die Zahl der Kraftfahrzeuge und die spezifische Jahresfahrleistung zunehmen werden, wodurch – trotz Katalysators – von einem u.a. in Schwellen- und 3. Weltländern weiteren Emissionsanstieg ausgegangen werden muß.

Die Emissionsstärke der BVOC, zu denen in der

Hauptsache das Isopren und die Gruppe der Monoterpene zählen, korreliert positiv mit der Höhe der Lufttemperatur und für Isopren auch mit der solaren Strahlungsstromdichte.

Biogene Kohlenwasserstoffe weisen auch bei geringen Konzentrationen aufgrund ihrer Reaktivität ein hohes Ozonbildungspotential auf. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, daß ihr Anteil an der gesamten globalen Kohlenwasserstoffemission bei etwa 90% liegt (GUENTHER et al. 1993). Biogene Kohlenwasserstoffe können auch in Städten trotz ihrer dort allgemein niedrigen Immissionskonzentrationen einen bedeutenden Einfluß auf die Ozonbildung haben, wie verschiedene Untersuchungen an städtischem Grün belegen (BENJAMIN et al. 1996). Bei den zu erwartenden klimatischen Veränderungen wird die chemische Umsatzrate der Vorläufersubstanzen zunehmen; hierdurch und durch den Anstieg der Stickoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen dürften die Ozonkonzentrationen ein höheres Niveau als heute erreichen. Den Zusammenhang der Ozonimmissionen mit der Lufttemperatur zeigt Abb. 3.35-3 auf der Basis von Messungen in einem großen innerstädtischen Park der Stadt Essen. Für den Temperaturbereich 25–30 °C errechnet sich hiernach eine Zunahme der Ozonkonzentration von 5 %/°C. Es ist allerdings zu berücksichtigen, daß die Lufttemperatur im wesentlichen von der Einstrahlung abhängt, so daß es sich im dargestellten Fall auch um eine Scheinkorrelation handeln kann.

Schlußbetrachtung

Die atmosphärische Umweltqualität einer Stadt wird hauptsächlich durch die thermische und lufthygienische Komponente des bioklimatischen Wirkungskomplexes bestimmt.

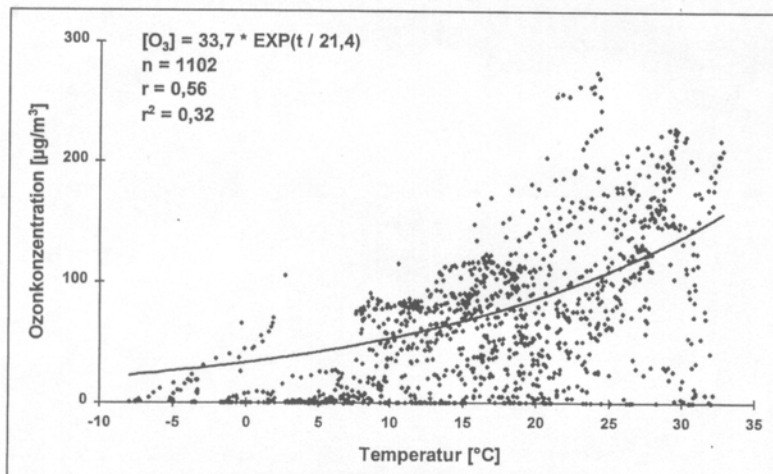


Abb. 3.35-3: Ozonkonzentration $[O_3]$ als Funktion der Lufttemperatur (t) für Strahlungstage innerhalb eines 70 ha großen innerstädtischen Parks in Essen (Datenbasis: 1 231 30-min.-Mittelwerte; vom Mai 1995 bis September 1997)

Wie exemplarisch dargelegt wurde, ist davon auszugehen, daß sich in den subtropischen und gemäßigten Klimaten die Anzahl der Tage mit hohen sommerlichen Lufttemperaturen erhöhen und die räumliche Verbreitung von Gebieten mit thermischem Diskomfort vergrößern werden. Die thermische Situation würde sich in den kühlgemäßigten Städten hingegen verbessern.

Die Ozonkonzentrationen als Leitkomponente des Sommersmogs werden ansteigen und die Verbreitung dieses Smogtyps dürfte sich auch auf Gebiete ausdehnen, in denen diese Luftverschmutzung heutzutage noch nicht auftritt. Für den vorbeugenden Umweltschutz stellt sich die Frage, welche Vorkehrungen getroffen werden müssen, um die prognostizierte Entwicklung zu beeinflussen. Minderungsmaßnahmen, die beispielsweise auf eine Verbesserung der Luftqualität abzielen, sollten – sofern dieses technisch möglich ist – natürlich direkt an den verschiedenen Emissionsquellen ansetzen.

Vorgabe für die Stadtplanung wäre darüber hinaus ein systematisches Anlegen von Ventilationsschneisen, die ein möglichst tiefes Eindringen von Umlandfrischluft ins Stadttinnere zu gewährleisten hätten. Darüber hinaus würde sich empfehlen, den Anteil urbaner Grünflächen zu vergrößern, und zwar sowohl ebenerdig als auch an geeigneten Fassaden und auf Dächern. Hierfür wären Pflanzenarten zu verwenden, die sich gegenüber dem städtischen Umweltstreß bereits seit Jahrzehnten als relativ tolerant erwiesen haben. Hinweise hierzu gibt WITTIG (1991). Grundsätzlich sind nach TAHA (1996) folgende Wohlfahrtswirkungen durch eine verstärkte städtische Begrünung zu erwarten:

- Eine Abnahme der Strahlungs- und Lufttemperaturen im bodennahen Bereich würde beispielsweise nicht nur den thermischen Komfort erhöhen, sondern auch zu Energieeinsparungen durch Beschattung und Windschutz führen. Die amerikanische Forstbehörde geht, unter der Voraussetzung, daß 100 Mio. Bäume in Nordamerika zusätzlich angepflanzt würden,

von Kostenreduzierungen durch Energieeinsparung in der Höhe von 4 Mrd. US \$ pro Jahr aus (IPCC 1996b). Ferner würden die chemischen Reaktionsbedingungen – in Hinblick auf eine Senkung der Umsatzraten – positiv beeinflusst,

- Eine Reduktion der temperatur- und strahlungsabhängigen biogenen Kohlenwasserstoffemissionen, bewirkt eine Verringerung des Ozonbildungspotentials. Bei der Auswahl des entsprechenden Pflanzgutes müßte jedoch darauf geachtet werden, daß nur solche Pflanzen Verwendung fänden, die hinsichtlich der Freisetzung von Isopren und Monoterpenen zur Gruppe der sogenannten emissionsarmen Species zählen, um nicht durch die hohe Vegetationsdichte einen die Ozonbildung beschleunigenden – und damit sich gegenteilig auswirkenden – Prozeß zu begünstigen. Als Orientierungswerte für die Emission werden dazu Freisetzungsraten von weniger als 2 µg/[g·h] (Blatttrockenmasse) Isopren bzw. weniger als 1 µg/[g·h] an Monoterpenen empfohlen,
- Durch Vergrößerung pflanzenexponierter Oberflächen und der Zunahme rauhigkeitsbedingter Depositionsgeschwindigkeiten erfolgt eine verstärkte Ablagerung von Luftverunreinigungen (KUTTLER 1991),
- Eine über die pflanzliche Photosynthese verstärkte erfolgreiche Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre führt zur Reduzierung dieses klimawirksamen Gases.

Eine Erforschung der Auswirkungen der potentiellen Erwärmung der Atmosphäre auf die bestehenden klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse von Ballungsräumen steht erst noch am Anfang. Hinderlich für eine systematische Analyse sind die große Komplexität städtischer Ökosysteme sowie deren äußere Prägung durch ihre geographische Lage in den verschiedenen Klimazonen der Erde.

Eine Initiierung respektive Intensivierung von Arbeiten auf diesem Gebiet erscheint aus der Sicht der Stadtklimatologie deshalb dringend geboten ♦

LITERATUR

BENJAMIN, M. T., M. SUDOL, L. BLOCH & A. M. WINER (1996): Low-emitting urban forests: a taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates. *Atmospheric Environment*, 30, 9, 1437-1452.

GUENTHER, A. B., P. R. ZIMMERMAN, P. C. HARLEY, R. K. MONSON, R. FALL (1993): Isoprene and monoterpene emission rate variability: Modell evaluation and sensitivity analyses. *J. Geophys. Res.* 98, 12, 609-617.

HUPFER, P. (1996): *Unsere Umwelt: Das Klima. Globale und lokale Aspekte.* B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart und Leipzig. 335 S.

IPCC WG II (1996b): *Climate Change 1995 – Impacts, Adaptations and Mitigations of Climate Change: Scientific-Technical Analyses: Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Edited by WATSON, R. T., M. C. ZINYOWERA & R. H. MOSS. Cambridge University Press. 878 pp.

KUTTLER, W. (1991): Transfer mechanism and deposition rates of atmospheric pollutants. In: ESSER, G. & D. OVERDIECK (Eds.): *Modern Ecology. Basic and Applied Aspects*, Elsevier, Amsterdam. 509-538.

KUTTLER, W. (1993): Stadtklima. In: SUKOPP, H. & R. WITTIG (Hrsg.): *Stadtökologie*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. 113-150.

KUTTLER, W. (1997): *Städtische Klimamodifikation.* VDI-Berichte 1330, 87-108.

LANDSBERG, H. E. (1981): *The Urban Climate.* International Geophysics Series. 28, Academic Press, New York. 275 pp.

OKE, T. R. (1994): *Global Change and Urban Climates.* Proc. 13th Intern. Congr. Biometeor., 12-18 Sept. 1993, Calgary, Canada, 123-134.

TAHA, H. (1996): Modelling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, 30, 20, 3423-3430.

WAGNER, D. (1994): *Wirkung regionaler Klimaänderungen in urbanen Ballungsräumen.* Spezialarb. a.d. AG Klimaforschung, Meteor. Inst., Humboldt-Univ. Berlin 7, 1-14.

WITTIG, R. (1991): *Ökologie der Großstadtflora.* UTB 1587, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 261 S.