

H. MAYER, A. MATZARAKIS

6 Zukunftsperspektiven der Umweltmeteorologie

1 Einleitung

Für das Fachgebiet Umweltmeteorologie als Teildisziplin der Meteorologie existieren verschiedene Beschreibungen. Ihnen ist gemein, dass sich dieses Fachgebiet mit Prozessen und daraus resultierenden Zuständen beschäftigt, die durch anthropogene, physikalische und chemische Eingriffe in die atmosphärische Umwelt verursacht werden (s. auch Kapitel 1, 2, 3 und 5). Dabei handelt es sich hauptsächlich um Landnutzungsänderungen sowie die Freisetzung von luftverunreinigenden und klimarelevanten Substanzen. Weiterhin zählen zur Umweltmeteorologie die Auswirkungen dieser Eingriffe auf Organismen (Menschen, Pflanzen, Tiere), Stoffe und Materialien sowie Methoden zur ihrer Reduzierung.

Anthropogene Eingriffe in die atmosphärische Umwelt finden überall dort auf der Erde statt, wo Menschen Aktivitäten zeigen (u. a. BOODHOO 1997, WMO 1999, FABIAN 2002). Ihre Auswirkungen beschränken sich nicht nur auf die Eingriffsflächen selbst, sondern lassen sich oft noch in entfernteren Räumen nachweisen. Daher handelt es sich bei der Umweltmeteorologie um ein Fach mit internationaler Bedeutung. Maßnahmen zur Reduzierung anthropogener Eingriffe in die atmosphärische Umwelt müssten weltweit einen hohen Stellenwert besitzen. Die derzeitige Realität sieht jedoch – trotz eines Booms in der Umweltmeteorologie in den Industrieländern im 20. Jahrhundert – anders aus. In Entwicklungs- und Schwellenländern existieren nur unzureichende Aktivitäten zum Schutz der atmosphärischen Umwelt. In den industrialisierten Ländern wird die angewandte Umweltmeteorologie unterschiedlich gehandhabt, was sich u. a. in der differierenden Einbindung umweltmeteorologischer Aspekte in landesspezifische Gesetze erkennen lässt.

Ziel dieses Beitrages ist es, Zukunftsperspektiven der Umweltmeteorologie aufzuzeigen und zu diskutieren. Beginnend von einer knappen Bilanzierung umweltmeteorologischer Arbeiten wird dazu Stellung genommen, ob es überhaupt noch offene Fragen in der Umweltmeteorologie gibt, nachdem doch in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts sehr viele umweltmeteorologische Untersuchungen durchgeführt worden sind.

2 Kennzeichen der Umweltmeteorologie

Die Umweltmeteorologie ist sowohl grundlagen- als auch anwendungsbezogen. Sie hat einen stark interdisziplinären Charakter und weist daher Verbindungen

nicht nur zu anderen meteorologischen Fachgebieten, wie z. B. Grenzschichtmeteorologie, Stadtklimatologie, Topoklimatologie, Luftchemie, Luftreinhaltung, Human-Biometeorologie und Klimaforschung, sondern auch zu weiteren umweltrelevanten Disziplinen auf, wie z. B. Bodenkunde, Geographie, Hydrologie, Land- und Forstwirtschaft, Landschaftsökologie, Materialwissenschaft, Ressourcenschutz, Stadtethnologie, Umweltmedizin, Umweltrecht, Umweltökonomie, Umweltsoziologie und Umweltmanagement. Wesentliche Inhalte der Umweltmeteorologie sind Diagnose, Prognose und Bewertung von anthropogen beeinflussten atmosphärischen Umweltbedingungen in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenebenen sowie Entwicklung und Anwendung von Strategien zum Abbau von Belastungen der atmosphärischen Umwelt (MAYER 2000).

Ein zentrales Aufgabengebiet der Umweltmeteorologie bildet die Beschäftigung mit den räumlich und zeitlich variablen Gliedern der Kausalkette für Luftbeimengungen (Abb. 6-1), die sich nicht nur auf umweltrelevante Spurenstoffe (z. B. NO, NO₂, CO, Schwebstaubfraktionen, VOCs oder Ozon), sondern auch auf klimarelevante Substanzen (z. B. CO₂, CH₄ oder FCKWs) bezieht. Daneben werden in der Umweltmeteorologie Fragestellungen behandelt, die andere umweltrelevante Bereiche betreffen, wie thermische Komponente des Klimas (umfasst die gesamte Energetik), UV-Strahlung, Gerüche, Lärm, Windwirkungen, Wechselwirkungen zwischen den atmosphärischen Bedingungen im Freien und in geschlossenen Räumen, Wirkungen von umweltmeteorologischen Prozessen und Zuständen sowie erneuerbare Energien.

Die Bandbreite umweltmeteorologischer Arbeiten ist in der Literatur zahlreich dokumentiert (u. a. FENGER 1999, HELBIG et al. 1999, MAYER 1999, GRIMMOND und OKE 1999, SPRONKEN-SMITH et al. 2000, MATZARAKIS 2001, FABIAN 2002, KUTTLER et al. 2002, MASSON et al. 2002, SVENSSON und ELIASSON 2002, WIENERT und KUTTLER 2002, SVENSSON et al. 2003). Beispiele dafür sind: Ausbreitung von Luftverunreinigungen, Treibhausgasen, Gerüchen und Lärm, räumliche und zeitliche Verteilungsmuster sowie Trends von Luftverunreinigungen und Treibhausgasen, meteorologische Einflüsse auf Immissionen, Intensitäten, Trends, Klimazonenabhängigkeit und Auswirkungen der urbanen Wärmeinsel, Energetik von urbanen Räumen, Parametrisierung physikalischer und chemischer Eigenschaften von Ballungsgebieten in mikro- und mesoskaligen Modellen, Bestimmung von schwachen Windströmungen in urbanen Räumen (Kalt- und

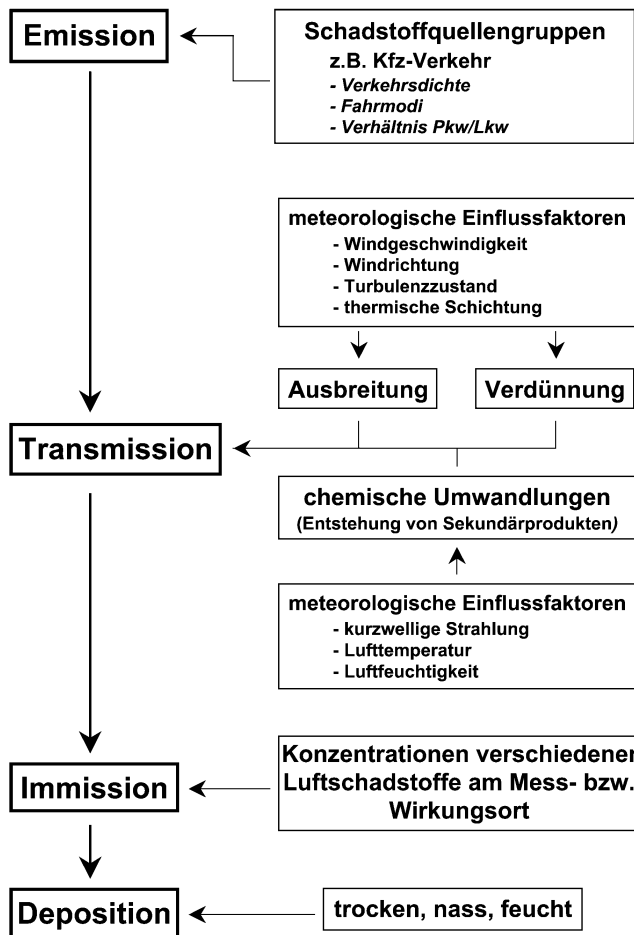


Abb. 6-1: Kausalkette für Luftbeimengungen mit ausgewählten Einflussfaktoren (nach MAYER 2000).

Frischlufthbahnen), Wärmewirkung und biologische Wirkung von meteorologisch relevanter Strahlung, spektrale Absorption von Strahlung durch Luftbeimengungen, Sicherheitsanalysen und umweltmeteorologische Behandlung von akuten Störfällen, statische und dynamische Windlasten auf Bauwerke, Einflüsse von Gebäuden und sonstigen Strömungshindernissen auf das dreidimensionale Feld des Windvektors sowie die thermische und dynamische Turbulenz, Einflüsse von Lüftungsverhalten und Klimaanlage auf die lufthygienischen und thermischen Bedingungen in Innenräumen, landnutzungsabhängige Deposition von Stickstoff, gasspezifische Depositionsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Landnutzungen, CO₂-Konzentrationen und -Flüsse in Ballungsgebieten, Analyse kombinierter Effekte von sommerlicher Hitze und hohen Ozonkonzentrationen in Ballungsgebieten und ihrer Umgebung, Methoden zur Bewertung der Auswirkungen von anthropogenen Eingriffen in die atmosphärische Umwelt, Material- und Energiesubstitution im Hinblick auf die Reduzierung von CO₂-Emissionen sowie Untersuchung von Standorten in Bezug auf ihr Potenzial für Solar- und Windenergieanlagen.

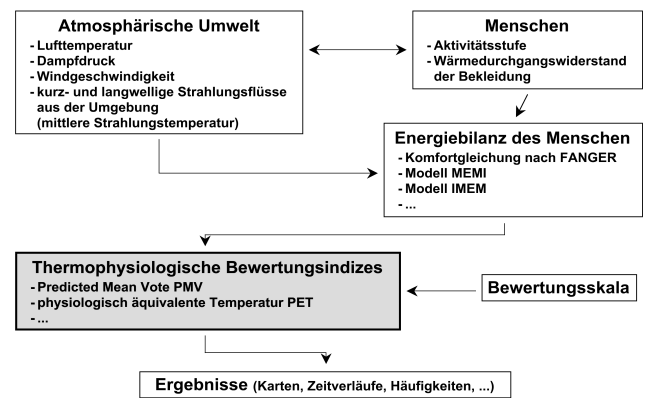


Abb. 6-2: Schema zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas.

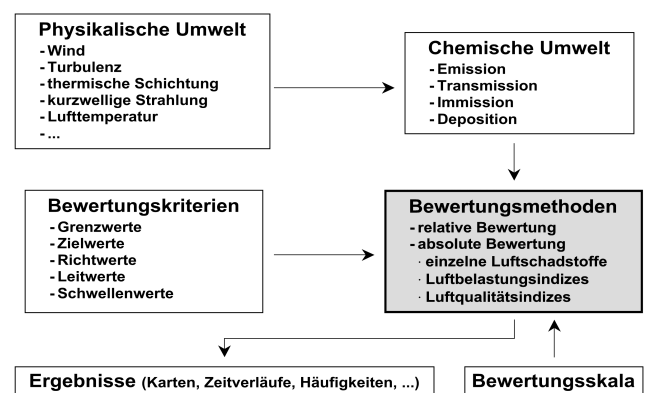


Abb. 6-3: Schema zur human-biometeorologischen Bewertung der lufthygienischen Komponente des Klimas.

3 Bilanzierung bisheriger umweltmeteorologischer Arbeiten

3.1 Gesetzliche Verankerung umweltmeteorologischer Belange

Obwohl es schon frühzeitig umweltmeteorologische Aussagen gab, z. B. die Empfehlung des griechischen Geographen Strabo im 1. Jahrhundert, Schmelzöfen für Silber möglichst hoch in das Gelände zu bauen, um den verderblichen Rauch in die Höhe abzuführen (FABIAN 2002), oder in Stuttgart im Jahr 1698 über die Behinderung der Zufuhr von frischer Luft durch Gebäude (BAUMÜLLER et al. 2000), ist die Etablierung des Fachgebiets Umweltmeteorologie eng mit den anthropogenen Eingriffen in die Atmosphäre verbunden, die Industrieländer im 20. Jahrhundert kennzeichneten. Mit ausschlaggebend war auch die erhöhte Sensibilität der Bevölkerung für Belange des Umweltschutzes. Das führte zu einem verstärkten Interesse der Politik am Schutz der atmosphärischen Umwelt, das sich manchmal bis zum politischen Druck ausweitete. In der Folge wurden umweltmeteorologische Aspekte in Gesetzen

(z. B. in Deutschland das Bundes-Immissionsschutzgesetz oder das Baugesetzbuch), Verordnungen, Verwaltungsvorschriften (z. B. in Deutschland die TA Luft), Richtlinien (im Bereich der EU die Richtlinie über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität mit den entsprechenden Tochter-Richtlinien) usw. verankert. In Deutschland erfolgte ab etwa den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts die Gründung von Landesämtern für Umweltschutz bzw. vergleichbarer Anstalten und des Umweltbundesamtes.

3.2 Umweltmeteorologische Untersuchungsmethoden

Für die Untersuchung von anthropogenen Eingriffen in die atmosphärische Umwelt wurden problemorientierte Methoden (u. a. statistische Analysen, temporäre Messungen, Profildfahrten, Vertikalsondierungen, Stichprobenverfahren, Modellierungen, Geruchsbegehungen, Bewertungsverfahren, GIS; s. auch Kapitel 2, 3 und 4) entwickelt, verbessert, räumlich/zeitlich verfeinert und angewendet (u. a. BAUMGARTNER et al. 1985, BRÜNDL et al. 1986, BÄCHLIN und THEURER 1995, KUTTLER 1996, JENDRITZKY 1998, HELBIG et al. 1999, SCHERER et al. 1999, FEHRENBACH et al. 2001, ALLWINE et al. 2002, CHRISTEN et al. 2002, DORAN et al. 2002, MESTAYER und DURAND 2002, ROTACH 2002). Die Grundlage dafür bilden spezielle Messverfahren (u. a. Tracer, Gasanalysatoren, Gaschromatographie, Fernerkundung, Eddy-Kovarianz, Sodar, Rass, Lidar, Windkanal) und geeignete numerische Modelle in der Meso- und Mikroskala. Umweltmeteorologische Messsysteme sowie physikalische und numerische Modelle befinden sich auf einem hohen Entwicklungs- und Leistungszustand. Rasche Fortschritte in anderen Fachgebieten, wie z. B. Mikroelektronik oder Informatik, geben umweltmeteorologischen Untersuchungsmethoden immer wieder neue Impulse.

3.3 Human-biometeorologische Bewertungsverfahren

Die Zielgruppe bei der Bewertung von Auswirkungen anthropogener Eingriffe in die atmosphärische Umwelt bilden häufig Menschen, so z. B. in der Stadtklimatologie oder Luftreinhalte (s. auch Kapitel 5). Den auf Menschen bezogenen Bewertungsverfahren, für die wegen der Objektivierung eine physikalische Basis angestrebt wird, liegt das human-biometeorologische Konzept von Wirkungskomplexen zugrunde (MAYER 1993). Daraus werden reproduzierbare Bewertungskriterien abgeleitet.

Zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas wurden in den letzten 30 Jahren physiologisch signifikante Indizes entwickelt und angewendet (u. a. JENDRITZKY 1998, HÖPPE 1999, MATZARAKIS et al. 1999, PICKUP und DE DEAR 2000, SVENSSON et al. 2003), die auf der

Energiebilanz des Menschen beruhen (Abb. 6-2). Kenngrößen aus früheren Jahren, wie Dampfdruck, effektive Temperatur oder Äquivalenttemperatur, deren Bezug zum thermischen Empfinden von Menschen über empirische Verfahren hergestellt worden ist, eignen sich nicht als thermophysiologisch relevante Indizes.

Zur Bewertung der lufthygienischen Bedingungen, die auch (z. B. in der Stadtklimatologie) als lufthygienische Komponente des Klimas bezeichnet werden, existieren substanz- und zeitabhängige Grenz-, Ziel-, Richt-, Leit- und Schwellenwerte. Ein Bezug zur Land- oder Flächennutzung ist allerdings meistens nicht gegeben. Die Beurteilung einzelner Substanzen stellt in jedem Land den Regelfall dar. Da jedoch auch ein Bedarf (z. B. in der Stadt- und Regionalplanung) an Kriterien zur Beurteilung der Luftqualität besteht, die über einzelne Substanzen hinaus mehrere quellentypische Luftverunreinigungen berücksichtigt (Abb. 6-3), wurden zusätzlich Luftbelastungs- und Luftqualitätsindizes entwickelt (u. a. KASSOMENOS et al. 1999, MAYER et al. 2002). Luftbelastungsindizes haben den Charakter von statistischen Indizes zur Kennzeichnung des relativen Gehalts der Luft an Verunreinigungen und sind daher ohne direkten Wirkungsbezug. Die Grundlage von Luftqualitätsindizes, von denen es derzeit in Deutschland nur einen Luftqualitätsindex zur täglichen Information der Bevölkerung gibt (MAYER et al. 2002), stellen substanzspezifische Konzentrationsbereiche dar, die auf Ergebnissen aus toxikologischen und epidemiologischen Untersuchungen beruhen. Luftqualitätsindizes zeichnen sich daher durch einen umweltmedizinischen Wirkungsbezug auf Menschen aus.

Das große Problem bei der flächendeckenden Bewertung von thermischer oder lufthygienischer Komponente des Klimas stellt die Bereitstellung von meteorologischen und lufthygienischen Daten dar, die in Abhängigkeit von der Auflösung solcher Bewertungskarten (im Bereich der thermischen Komponente des Stadtklimas bis zu 10 m) im entsprechenden Raster in der für Menschen relevanten Höhe (z. B. in Deutschland für die thermische Komponente des Klimas: 1,1 m Höhe über Grund) vorliegen müssen. Hierzu ist die Anwendung von geeigneten Modellen erforderlich. Bei kurzzeitigen und räumlich begrenzten Fallstudien wird diese Problematik dadurch umgangen, dass alle notwendigen Eingangsparameter gemessen werden.

3.4 Zielsetzungen umweltmeteorologischer Untersuchungen

Wie bereits im Abschnitt 2 erwähnt, haben umweltmeteorologische Untersuchungen als Zielsetzungen, anthropogene Eingriffe in die atmosphärische Umwelt in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenebenen diagnostisch und prognostisch zu quantifizieren sowie zu bewerten, um dann daraus vor dem Hintergrund umweltrelevanter Bedürfnisse Strategien zur Reduzie-

rung dieser Eingriffe zu entwickeln und umzusetzen. Sie sollten einen Flächen- bzw. Nutzungsbezug aufweisen.

Als Beispiel für Zielsetzungen umweltmeteorologischer Untersuchungen dient die Definition des idealen Stadtklimas, die im Oktober 1988 auf einem speziellen Workshop mit interdisziplinärer Beteiligung erarbeitet wurde (MAYER 1993). Demnach ist das *ideale Stadtklima* ein räumlich und zeitlich variabler Zustand der Atmosphäre in urbanen Bereichen, bei dem sich möglichst keine anthropogenen Schadstoffe in der Luft befinden und den Stadtbewohnern in Gegendnähe (charakteristische Länge: etwa 150 m, entspricht einer charakteristischen Zeit von etwa 5 min) eine möglichst große Vielfalt an urbanen Mikroklimaten unter Vermeidung von Extremen geboten wird. Ein solches ideales Stadtklima kann wegen verschiedenartiger Zwänge in der Stadtplanung nicht erreicht werden. Deshalb besteht z. B. die Aufgabe der Angewandten Stadtklimatologie darin, diesem Ideal durch Empfehlung von Maßnahmen zur Minimierung der Belastungen und zu stadtklimatisch wirksamen Umfeldverbesserungen möglichst nahe zu kommen. Zu solchen Maßnahmen zählen: Freihaltung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen (MATZARAKIS und MAYER 1992, MAYER 1996), Vermeidung von Hangbebauungen, Entsiegelung und Begrünung von versiegelten Flächen oder Verkehrskonzepte zur Reduzierung von Emissionen aus dem Kfz-Verkehr.

3.5 Umweltmeteorologie in der Anwendung und Lehre

Die breite Palette angewandter umweltmeteorologischer Untersuchungen ist in der umfangreichen Literatur zur Umweltmeteorologie dokumentiert. Sie werden auch auf speziellen Tagungen, von denen einige in regelmäßigen Abständen stattfinden (z. B. Fachtagungen METTOOLS des Fachausschusses Umweltmeteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, Symposien on the Urban Environment der Amerikanischen Meteorologischen Gesellschaft, International Conferences on Urban Climate (ICUC) der International Association for Urban Climate), intensiv diskutiert, siehe dazu auch die Tabellen 1-1, 1-2, 1-4 und 1-5 im Kapitel 1. Aus Verfahrensgründen ist es zweckmäßig, umweltmeteorologische Methoden, die in der Praxis angewendet werden, zu standardisieren. Als Forum dafür bietet sich ihre Aufnahme in Ausführungsbestimmungen (Verwaltungsvorschriften) zu Umweltschutzgesetzen oder internationale und nationale technische Regeln (z. B. in Deutschland die VDI-Richtlinien der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN) an.

Die Akzeptanz von Ergebnissen umweltmeteorologischer Untersuchungen in Entscheidungsprozessen (z. B. in der Stadt- und Regionalplanung oder für die Errichtung von Kraftwerken, Deponien oder Windkraftanlagen) ist aus unterschiedlichen Gründen variabel (u. a. ELIASSON 2000). Neben differierenden Schwerpunkten in den Prozessen der Entscheidungs-

findung ist dafür auch die große Streuung in der Qualität bisheriger umweltmeteorologischer Untersuchungen (u. a. wegen Kosten- und Zeitdruck oder unzureichender Qualität der Bearbeiter) verantwortlich. Dadurch werden sie oft ihrer jeweils spezifischen Aufgabenstellung und Zielsetzung nicht gerecht und können den Vergleich mit Unterlagen für andere Entscheidungsfaktoren nicht bestehen. Es war bisher aber auch nicht immer einfach, das langfristige Vorsorgeprinzip der Umweltmeteorologie nachhaltig durchzusetzen, weil zeitweilig anderen Belangen (z. B. kurzfristiger ökonomischer Erfolg) der Vorzug in Entscheidungsprozessen gegeben wurde. Diese Problematik besteht in Entwicklungs- und Schwellenländern viel dramatischer als in Industrieländern.

Der Bedeutung des Fachgebietes Umweltmeteorologie wird in der Ausbildung durch spezielle Lehrangebote an Fachhochschulen, Universitäten oder vergleichbaren Einrichtungen Rechnung getragen. So finden sich in Vorlesungsverzeichnissen häufig Lehrveranstaltungen z. B. zur Stadtklimatologie, Luftreinhaltung, Grenzschichtmodellierung, Human-Biometeorologie, Umweltmesstechnik, Fernerkundung oder aktuellen Klimaproblematik.

4 Zukunft der Umweltmeteorologie

4.1 Notwendigkeit weiterer Entwicklungen

Aus vielen experimentellen und modellmäßigen Untersuchungen grundlagen- und anwendungsbezogener Art, die meistens in Industrieländern durchgeführt wurden, liegen umfangreiche Datensätze und sonstige Ergebnisse zu umweltmeteorologischen Fragestellungen vor. Dennoch wird es routinemäßige umweltmeteorologische Analysen, wie z. B. zu den thermischen und lufthygienischen Auswirkungen von Planungsvorhaben oder zur Ausbreitung von Gerüchen, wohl immer geben, u. a. weil oft ein lokaler Bezug herzustellen ist. In Deutschland bildet dafür die gesetzliche Verankerung der Umweltmeteorologie die Grundlage. Bei der Fülle von Resultaten aus umweltmeteorologischen Arbeiten einerseits sowie zurückgehenden Emissionen von „klassischen“ Luftschadstoffen in den Industrieländern andererseits (exemplarisch für Deutschland in der Abb. 6-4) stellt sich aber die Frage nach Problemen in der grundlagen- und anwendungsbezogenen umweltmeteorologischen Forschung, für die bisher nur unzureichende Lösungen existieren. Unterschiedliche Beispiele dafür aus Deutschland sind:

- a) Entwicklungen der Jahresmittelwerte der Luftschadstoffe NO und NO₂ (beispielhaft an ausgewählten amtlichen Luftmessstationen in Baden-Württemberg in den Abb. 6-5 und 6-6), die keine eindeutigen Trends zeigen, wie sich aufgrund der abnehmenden jährlichen NO_x-Emissionen vermuten ließe.

b) Entwicklung der jährlichen Emissionen des klimarelevanten Gases CO₂ (Abb.6-7), die trotz vielfältiger Klimaschutzaktionen nur einen gering fallenden Trend aufweisen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Anteil Deutschlands an den weltweiten, anthropogenen CO₂-Emissionen derzeit unter 5 % liegt.

Aus Statusberichten und auf Konferenzen zu umweltmeteorologischen Themen werden ebenfalls akute Defizite in der umweltmeteorologischen Forschung deutlich. Verantwortlich sind dafür nicht nur weitere Landnutzungsänderungen, die durch die Ausdehnung von Siedlungs- und Industriegebieten einschließlich der damit zusammenhängenden energetischen Konsequenzen verursacht werden, sondern auch die Globalisierung umweltmeteorologischer Probleme. Sie erreichen in den Entwicklungs- und Schwellenländern ein derartiges Ausmaß, dass ein sofortiger Handlungsbedarf besteht. So zeigen z. B. die Immissionen von luftverunreinigenden und klimarelevanten Substanzen in den dortigen Ballungs- und Industriegebieten ein deutlich höheres Niveau (u. a. RAGA et al. 2001). Die Intensität und räumliche Ausdehnung des urbanen Wärme-archipels steigen in den Super- und Megacities dieser

Länder aufgrund der raschen Zunahme der Bevölkerung an. Noch nicht ganz geklärt ist dabei die Rolle des anthropogenen Treibhauseffekts (WMO 1999).

Aus der Analyse von Fortschritten in der grundlagen- und anwendungsbezogenen Umweltmeteorologie ergibt sich, dass die noch bestehenden Unterschiede zwischen Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern abzubauen sind. Ein Weg dazu wäre z. B. der Transfer von Verfahren und Beurteilungswerten, die sich in Industrieländern bewährt haben. Zu berücksichtigen ist,

- ob vergleichbare räumliche und zeitliche Ebenen für umweltmeteorologische Arbeiten existieren,
- ob Möglichkeiten bestehen, umweltmeteorologische Ergebnisse in der Praxis anzuwenden,
- welche sozioökonomischen Folgen daraus resultieren,
- wie sich umweltmeteorologische Untersuchungen in diesen Ländern permanent finanzieren und durchführen lassen.

Dabei sind als meteorologische Rahmenbedingungen globale Veränderungen im physikalischen und chemischen Zustand der Atmosphäre mit unterschiedlicher regionaler Ausprägung vorgegeben.

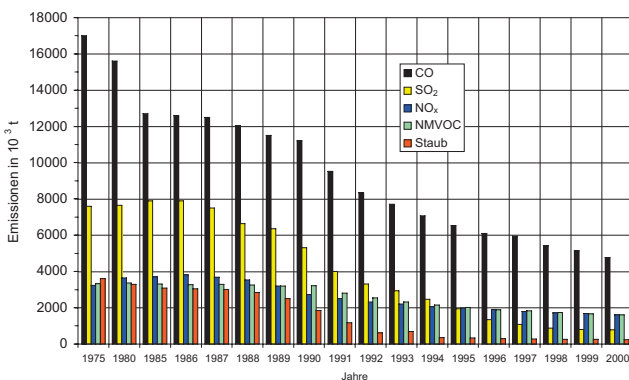


Abb.6-4: Jährliche Emissionen von „klassischen“ Luftschadstoffen in Deutschland (nach Angaben des Umweltbundesamtes).

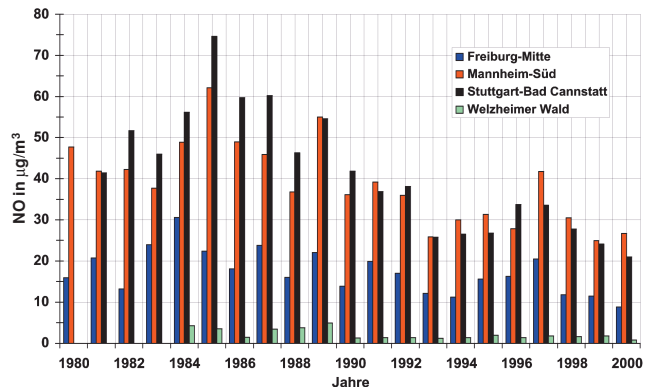


Abb.6-5: NO Jahresmittelwerte an ausgewählten amtlichen Luftmessstationen in Baden-Württemberg (nach Angaben der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg).

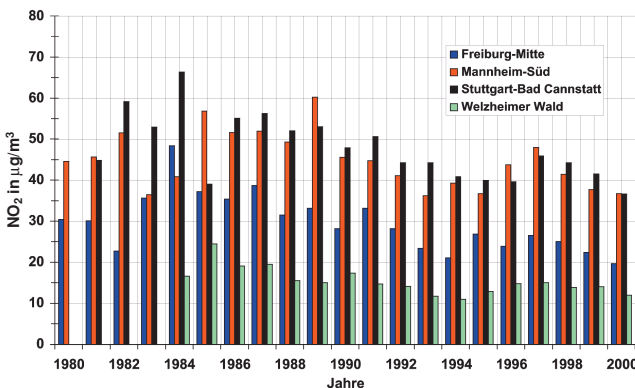


Abb.6-6: NO₂ Jahresmittelwerte an ausgewählten amtlichen Luftmessstationen in Baden-Württemberg (nach Angaben der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg).

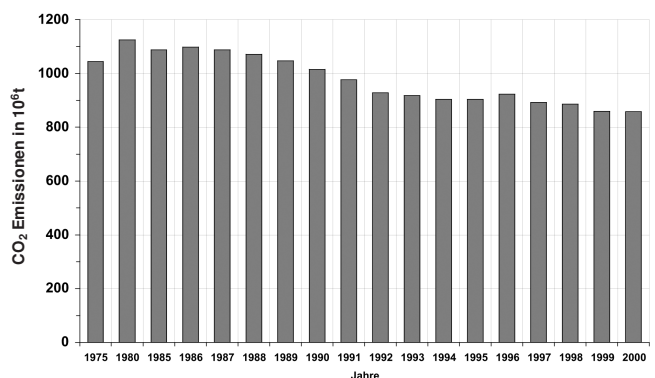


Abb.6-7: Jährliche CO₂ Emissionen in Deutschland (nach Angaben des Umweltbundesamtes).

Insgesamt resultiert daraus, dass im breiten Feld der Umweltmeteorologie auch in Zukunft grundlagen- und anwendungsbezogene Untersuchungen erforderlich sind. Im Vergleich zu früheren Arbeiten wird es aber eine partielle Verlagerung der Zielsetzungen geben. So müssen sich zukünftige Untersuchungen in der Umweltmeteorologie stärker als bisher an Kriterien wie Evaluation, Interdisziplinarität, Internationalität und Qualitätssicherung orientieren.

4.2 Überprüfung traditioneller Vorstellungen über umweltmeteorologische Phänomene

Die Überprüfung von traditionellen Vorstellungen über umweltmeteorologische Phänomene und Prozesse dient ihrer permanenten Bedeutung. Beispiele dafür sind der Abfluss von Kaltluft oder Flurwinde.

Der *Kaltluftabfluss* hat wegen seiner vermeintlich positiven Wirkung eine große Bedeutung in der Stadt- und Regionalplanung. Entscheidende Faktoren für die Beurteilung von Kaltluftabfluss sind Eintrittszeitpunkt, Intensität, Volumenstrom und Wirkungsraum (u. a. KUTTLER 2002). Kaltluftabfluss tritt wegen seines energetischen Entstehungsprozesses in der Nacht auf, d. h. zu Zeiten, in denen zumindest in mitteleuropäischen Ballungsgebieten eine weitere Abkühlung der Luft, die über den üblichen Tagesgang der Lufttemperatur hinausgeht, für das menschliche Wohlbefinden nur während ausgeprägter Hitzeperioden im Sommer wünschenswert ist.

Bei solch extremer Witterung sind Menschen jedoch vielmehr daran interessiert, wie sich der großräumig vorgegebene, thermische Stress vor allem mittags und nachmittags reduzieren lässt. Dafür eignen sich Planungsmaßnahmen in allen Maßstabsebenen (u. a. stadtklimagerechte Muster urbaner Flächennutzungen oder kleinräumige Klimamanipulationen z. B. durch Straßenbegleitgrün, Dach- und Fassadenbegrünung). Dadurch könnte auch die Akkumulation von Wärme in den Gebäuden und Freiräumen einer Stadt, unter der Menschen während längerer Hitzeperioden leiden, nachhaltiger als durch den nächtlichen Kaltluftabfluss allein eingeschränkt werden.

Im Winterhalbjahr ist es ohnehin paradox, die Wirkung des Kaltluftabflusses als positiv einzustufen, da er dann nur negative Konsequenzen aufweist, wie die Gefährdung empfindlicher pflanzlicher Sonderkulturen sowie Förderung von Bodenfrost und Bodennebel.

Mit dem Zufluss von Kaltluft wird häufig Frischluft herangeführt, die im Allgemeinen frei von bodengebundenen Primärschadstoffen ist. In kalter Luft ist die bodennahe Atmosphäre stabil geschichtet, so dass die Eigenschaft von Frischluft nicht mehr gegeben ist, wenn sich auf ihrer Bahn Emissionsquellen (z. B. Kfz-Verkehr, Hausbrand oder Geruch) befinden, weil die

Ausbreitung und Verdünnung der dadurch freigesetzten Emissionen behindert wird. Dieses Phänomen ist häufig schon bald nach dem Übergang vom ländlichen Umland in Siedlungsgebiete zu beobachten.

Unter *Flurwinden* werden thermisch induzierte Zirkulationen zwischen der wärmeren Stadt und dem kühleren ländlichen Umland verstanden (u. a. BARLAG und KUTTLER 1990/1991, DÜTEMEYER 2000, LEMONSU und MASSON 2002), wobei die Einschränkung auf ebenes Gelände besteht. Thermische Zirkulationen infolge von Reliefeinflüssen (u. a. BAUMÜLLER und REUTER 1996) fallen nicht in die Kategorie der Flurwinde. Den potenziellen, schwachen Flurwindströmungen, die durch thermisch bedingte Luftdruckunterschiede verursacht werden, stehen jedoch Reibungskräfte unterschiedlichen Ausmaßes infolge der unregelmäßig erhöhten aerodynamischen Oberflächenrauigkeit von Stadtgebieten gegenüber. Bei urbanen Flächennutzungen mit niedriger Oberflächenrauigkeit, aber unterschiedlichem thermischen Niveau (z. B. Graslandfläche neben einem größeren asphaltierten Parkplatz) sind vor allem tagsüber kleinere thermische Zirkulationszellen nachweisbar. Ob allerdings der nächtliche Wärmeinseleffekt für die regelmäßige Erzeugung von Flurwinden ausreicht, muss wegen lokaler Einflussfaktoren (u. a. übergeordnetes regionales Strömungsfeld, Muster urbaner Flächennutzungen) eher kritisch beurteilt werden. Simulationsberechnungen mit numerischen Modellen zu Flurwinden kommen bislang noch zu keinem endgültigen Resultat, u. a. weil sie den Sprung in der aerodynamischen Oberflächenrauigkeit zwischen Umland und Stadtrand noch nicht ausreichend wiedergeben können. Messungen zu Flurwinden, z. B. in geeigneten Luftleitbahnen, weisen zwar auf ihre zeitweilige Existenz hin. Allerdings existiert bis jetzt noch keine standardisierte, physikalisch abgesicherte Messmethodik für Flurwinde.

4.3 Verstärkung interdisziplinärer Arbeiten

Wegen der vielen Beziehungen zu anderen Fachgebieten ist in der Umweltmeteorologie eine Verstärkung von interdisziplinären Arbeiten über das bisherige Ausmaß erforderlich. Nur durch eine intensive Zusammenarbeit zwischen Experten aus den einzelnen Fachgebieten lassen sich Antworten auf fächerübergreifende Fragestellungen der Umweltmeteorologie finden, die ein Niveau erreichen, das der Aufgabenstellung gerecht wird. Durch vermehrte interdisziplinäre Arbeiten wird nicht nur der Kontakt zwischen Experten der einzelnen Fachgebiete, sondern auch zwischen Wissenschaft und Praxis gefördert. Dadurch lässt sich u. a. ein besseres Verständnis von Ausdrucksweise und Terminologie anderer Fachgebiete erzielen, was letztlich zu einer Optimierung der Arbeiten führt. Das in diesem Bereich immer noch beachtliche Defizit lässt sich anhand eines Beispiels aus der Stadtklimatologie erläutern. Hier existieren Arbeiten von Umweltwissen-

schaftlern verschiedener Fachrichtungen über thermische und lufthygienische Auswirkungen von Planungsmaßnahmen, denen es nicht selten an Planungsrelevanz mangelt (z. B. wegen Fallstudiencharakters oder ungeeigneter Zielgrößen).

4.4 Bedarf an umweltmeteorologischen Untersuchungen mit internationalem Charakter

Die Schwerpunkte zukünftiger umweltmeteorologischer Untersuchungen werden sich von der nationalen auf die internationale Ebene verlagern, wobei Ballungs- und Industriegebiete in Entwicklungs- und Schwellenländern dominierende Untersuchungsobjekte bilden. Dort ist ein rapider Anstieg an umweltmeteorologischen Belastungen zu beobachten, während effiziente umweltschonende Verordnungen und Maßnahmen aus verschiedensten Gründen (u. a. Ausrichtung auf ökonomischen Erfolg, geringer Stellenwert der Umweltmeteorologie) bisher kaum festzustellen sind. In internationalen Fachzeitschriften deutet sich der Trend zu verstärkten umweltmeteorologischen Untersuchungen in Entwicklungs- und Schwellenländern bereits im Bereich der lufthygienischen Komponente des Klimas an.

Um in diesen Regionen letztlich auch eine umweltrelevante Vorsorgeplanung zu erreichen, wie sie sich in manchen Industrieländern inzwischen zum Standard entwickelt hat, muss diskutiert werden, inwieweit Methoden und Ergebnisse aus umweltmeteorologischen Untersuchungen in Industrieländern in Schwellen- und Entwicklungsländern angewendet werden können. Dabei bilden die moderne Kommunikationstechnologie und geographische Informationssysteme wichtige Transfermedien. So sind jetzt schon umweltmeteorologische Informationen, wie Software, Daten oder Karten, global über das Internet verfügbar. Dabei stellt sich eine Bündelung von Informationen, wie in der Stadtklimatologie über die internationale Stadtklima-Homepage (<http://www.stadtklima.de>), als zweckmäßig heraus (MATZARAKIS et al. 1998b).

Vor dem Hintergrund der Reduzierung von anthropogenen Eingriffen in die atmosphärische Umwelt, wie die Freisetzung von klimarelevanten Spurenstoffen (u. a. IDSO et al. 2001, GRIMMOND et al. 2002), erlangen in der internationalen Umweltmeteorologie Arbeiten über die Ausnutzung von erneuerbaren Energien eine wachsende Bedeutung. Sonne, Wind und Wasser stellen dafür ein klimazonen- und standortabhängiges Potenzial dar. Im globalen Mittel wird an der Erdoberfläche die solare Energie in Form von Globalstrahlung prinzipiell im Überfluss angeboten (KRAUS 2001). Die spezifische Eignung von regionalen und lokalen Standorten für die jeweilige erneuerbare Energieform lässt sich aus umweltmeteorologischen Analysen ableiten. Intensiver als bisher sind auch Auswirkungen solcher Anlagen auf die atmosphärische Umwelt zu untersuchen (u. a. ROULET 2001).

4.5 Stärkung der Qualitätssicherung

National und international steigt die Bedeutung der Qualitätssicherung im Bereich der Umweltmeteorologie (u. a. THUNIS et al. 2003). Sie muss standardisiert werden, wofür sich technische Regeln anbieten. Die Qualitätssicherung ist vielschichtig. Sie beginnt bei den Mitgliedern einer Arbeitsgruppe, die entsprechende Regeln erstellen und daher die notwendige fachspezifische Qualifikation besitzen müssen. Sie sollten mit Namen und Institution in den technischen Regeln aufgeführt werden. Diese Namensnennung erfolgt z. B. national in den DVWK-Merkbättern oder international in den *American National Standards*, jedoch nicht in DIN-Normen oder VDI-Richtlinien.

Die Qualitätssicherung bezieht sich auch auf Mess- und Auswertungsverfahren, Modellrechnungen, Ergebnisse, Bewertungen und Anwendungen. Die Methoden und Kriterien für die Qualitätssicherung von umweltmeteorologischen Modellen benötigen belastbare Validierungs- bzw. Testdatensätze, die selbst nur über qualitätskontrollierte Methoden (Natur- und Modellmessungen) erhoben werden können. Solche Datensätze, die vielfältig in Bezug auf unterschiedliche Fragestellungen sind, existieren derzeit nicht im erforderlichen Umfang.

4.6 Beispiele für konkrete Fragestellungen in der Umweltmeteorologie

Die in den vorangehenden Abschnitten zusammengestellten zukünftigen Aufgaben waren mehr grundsätzlicher Art. Der dadurch vorgegebene Rahmen für Zukunftsperspektiven in der Umweltmeteorologie wird nachfolgend exemplarisch, d. h. ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit, durch konkrete Fragestellungen ausgefüllt, die auch die große Bandbreite der Umweltmeteorologie widerspiegeln (u. a. GROß 1987, 1996, MATZARAKIS und MAYER 1992, 1996, MATZARAKIS et al. 1998a, FEIGENWINTER et al. 1999, HELBIG et al. 1999, SCHATZMANN et al. 1999, MAYER 2000, AKBARI et al. 2001, NIKOLOPOULOU et al. 2001, YANNAS 2001, BEST und BETTS 2002, FABIAN 2002, GRIMMOND und OKE 2002, HERBERT und HERBERT 2002, MARTILLI et al. 2002, ARNFIELD 2003, VARDOULAKIS et al. 2003). Sie sind nach globaler, regionaler und lokaler Maßstabebene sowie nach human-biometeorologischen Wirkungsbezügen und sozioökonomischen Konsequenzen angeordnet.

a) Globale Maßstabebene

- Mit welchen realistischen Maßnahmen lassen sich vor dem Hintergrund der derzeitigen Bedingungen auf der Erde anthropogene Eingriffe in die atmosphärische Umwelt so reduzieren, dass das Ziel eines wirksamen Klimaschutzes rasch erreicht wird?
- Wie lässt sich in den Ballungsgebieten der Entwicklungs- und Schwellenländer das routinemäßige

Monitoring von anthropogenen Eingriffen in die atmosphärische Umwelt optimieren?

- In welche Richtung verändern sich globale Stoffkreisläufe?
- Welche Auswirkungen haben Rußpartikel auf die atmosphärische Umwelt?
- Welchen Einfluss üben die wachsenden Ballungsgebiete auf den CO₂-Kreislauf und Klimaänderungen aus?

b) Regionale Maßstabsebene

- Welche Luftverunreinigungen und luftchemischen Prozesse sind zukünftig bei der Luftreinhaltung, insbesondere in Ballungsräumen, von Bedeutung?
- Welche weiteren Reaktionspfade weisen VOCs auf?
- Welchen Einfluss hat der zusätzliche Treibhauseffekt auf das Stadtklima, dessen bekanntestes Phänomen mit der urbanen Wärmeinsel bzw. dem urbanen Wärmearchipel schon selbst einen lokalen, anthropogenen Treibhauseffekt darstellt?
- Wie weit lassen sich methodische Voraussetzungen für die Erhöhung der Genauigkeit von Immissionsprognosen, die unter realistischen Bedingungen für praktische Anwendungen durchgeführt werden, erfüllen?
- Wie lassen sich umweltmeteorologische Folgen der ansteigenden Probleme bei der Entsorgung von Siedlungsgebieten (u. a. Müllkraftwerke, Deponien) minimieren?

c) Lokale Maßstabsebene

- Wie genau lässt sich die Ausbreitung von Luftverunreinigungen in unregelmäßigen Straßenschluchten und anderen komplexen urbanen Mikrostrukturen vor dem Hintergrund niedriger Windgeschwindigkeiten, thermischer Effekte infolge Einstrahlung sowie fester und sich bewegender Strömungshindernisse simulieren?
- Wie kann die Ausbreitung von Schwergasen, Gerüchen und Keimen realitätsnah mit Modellen simuliert werden?
- Gibt es eine optimale Dichte bzw. Gestaltung von Flächennutzungen ohne negative Auswirkungen auf die atmosphärische Umwelt?
- Welche Größenordnungen nehmen die Terme der Energiebilanzgleichung an der Grenze zwischen der *Urban Canopy Layer* und der *Urban Boundary Layer* (a) in Städten in verschiedenen Klimazonen und (b) für verschiedene Bereiche einer Stadt (z. B. Stadtzentrum, Reihenhaussiedlung oder innerstädtischer Park) an?
- Wie lässt sich die Freisetzung von anthropogener Wärme und anthropogenem Wasserdampf (u. a. aus Verbrennungsprozessen oder über die Verdunstung von Wasser aus Leitungen) in der Stadtatmosphäre räumlich/zeitlich quantifizieren?
- Wie können Klimatope in der Stadtklimatologie quantifiziert werden?

d) Auswirkungen auf Menschen

- Wie lässt sich in Ballungsgebieten unterschiedlicher Klimaregionen thermischer und lufthygienischer Komfort für Menschen auf der Ebene von Baukörperstrukturen erzielen?
- Welches Ausmaß müssen kleinräumige Klimamanipulationen in urbanen Räumen, wie durch Bäume, annehmen, um sich effektiv in positiver Weise auf die thermische und lufthygienische Komponente des Stadtklimas auszuwirken?
- Wie lauten Schwellenwerte für thermische Indizes unter Freilandbedingungen in verschiedenen Klimazonen? Wie werden sie durch die menschliche Klimaadaptation modifiziert? Wie ist Hitzestress für Menschen definiert?
- Welche Form haben planungsrelevante Luftqualitätsindizes für die Kurz- und Langzeitbelastung? Wie lauten Schwellenwerte für die wirkungsbezogene Bewertung der integralen Luftqualität zur Anwendung in Stadt- und Regionalplanung?
- Welche synergetischen Effekte bewirken Kombinationen von unterschiedlichen human-biometeorologischen Wirkungskomplexen?
- Können abgestufte, raumnutzungsspezifische Ziele für die human-biometeorologische Bewertung von thermischer und lufthygienischer Komponente des Klimas in der Stadt- und Regionalplanung festgelegt werden?

e) Sozioökonomische Konsequenzen

- Welche sozioökonomischen Folgen entstehen durch Eingriffe in die atmosphärische Umwelt in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen?

5 Schlussfolgerungen

Die weltweit zunehmende Akzeptanz der Umweltmeteorologie lässt sich z. B. durch die breite internationale Beteiligung an Fachtagungen oder am Zuwachs der Fachliteratur erkennen. Allerdings weist die Akzeptanzsteigerung regional erhebliche Unterschiede auf. In der politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsebene wird die Relevanz der Umweltmeteorologie ebenfalls unterschiedlich eingeschätzt. Sie ist in Epochen mit wirtschaftlichen und sozialen Problemen relativ gering. Daraus resultieren dann eine Einschränkung der Finanzmittel für die Förderung von umweltmeteorologischer Forschung und eine drastische Kürzung der Mittel für anwendungsbezogene umweltmeteorologische Arbeiten. Mit zunehmendem sozialem Wohlstand der Bevölkerung steigt hingegen die Bedeutung der Umweltmeteorologie an. Vor dem Hintergrund einer langfristigen, fundierten Vorsorgeplanung und damit eines nachhaltigen Umweltschutzes muss diese schwankende Kontinuität zukünftig auf einem höheren Niveau stabilisiert werden. Anthropogene Eingriffe in die physikalische und chemische Umwelt sowie dadurch hervorgerufene, fast immer nur negative Konsequenzen auf Schutzgüter (u. a. Beeinträchtigung von

Wohlbefinden und Gesundheit der Menschen) wirken stets über einen längeren Zeitraum. Sie lassen sich nur selten problemlos rückgängig machen. Daher ist es erforderlich, sie frühzeitig über qualitätsgesicherte umweltmeteorologische Verfahren zu erkennen, prognostizieren, beurteilen und minimieren.

Literatur

- AKBARI, H., M. POMERANTZ, H. TAHA, 2001: Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* **70**, 295-310.
- ALLWINE, K. J., J. H. SHINN, G. E. STREIT, K. L. CLAWSON, M. BROWN, 2002: Overview of URBAN 2000. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **83**, 521-536.
- ARNFIELD, A. J., 2003: Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* **23**, 1-26.
- BÄCHLIN, W., W. THEURER, 1995: Der Einsatz von Windkanälen bei Umweltfragen. *Staub – Reinhaltung der Luft* **55**, 383-388.
- BARLAG, A.-B., W. KUTTLER, 1990/1991: The significance of country breezes for urban planning. *Energy and Buildings* **15-16**, 291-297.
- BAUMGARTNER, A., H. MAYER, E.-M. NOACK, 1985: Abschlussbericht zum Teilprogramm „Thermalkartierung“ von STADTKLIMA BAYERN. *Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen*, Reihe Materialien Nr. **39**.
- BAUMÜLLER, J., U. REUTER, 1996: Stadtklimatologische Aspekte am Beispiel von Stuttgart. *Geowissenschaften* **14**, 229-232.
- BAUMÜLLER, J., U. HOFFMANN, U. REUTER, 2000: 300 Jahre Stadtklimatologie in Stuttgart – ein historischer Rückblick. Prepr. Fachtagung METTOOLS^{IV} des Fachausschusses *Umweltmeteorologie* der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, 11-15.
- BEST, M. J., R. A. BETTS, 2002: Urban areas in climate simulations. Prepr. Fourth Symposium Urban Environment, *AMS*, 9-10.
- BOODHOO, Y., 1997: Climate services and urban development. *WMO Bulletin* **46**, 41-43.
- BRÜNDL, W., H. MAYER, A. BAUMGARTNER, 1986: Abschlussbericht zum Teilprogramm „Klimamessungen München“ von STADTKLIMA BAYERN. *Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen*, Reihe Materialien Nr. **43**.
- CHRISTEN, A., R. VOGT, M. W. ROTACH, E. PARLOW, 2002: First results from BUBBLE II: partitioning of turbulent heat fluxes over urban surfaces. Prepr. Fourth Symposium Urban Environment, *AMS*, 137-138.
- DÜTEMEYER, D., 2000: Urban-orographische Bodenwindssysteme in der städtischen Peripherie Kölns. *Essener Ökologische Schriften*, Band **12**.
- DORAN, J. C., J. D. FAST, J. HOREL, 2002: The VTMX 200 campaign. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **83**, 537-551.
- ELIASSON, I., 2000: The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning* **48**, 31-44.
- FABIAN, P., 2002: Leben im Treibhaus. Berlin: *Springer-Verlag*, Heidelberg, 258 S.
- FEHRENBACH, U., D. SCHERER, E. PARLOW, 2001: Automated classification of planning objectives for the consideration of climate and air quality in urban and regional planning for the example of the region of Basel/Switzerland. *Atmospheric Environment* **53**, 5605-5615.
- FEIGENWINTER, C., R. VOGT, E. PARLOW, 1999: Vertical structure of selected turbulence characteristics above an urban canopy. *Theor. Appl. Climatol.* **62**, 51-63.
- FENGER, J., 1999: Urban air quality. *Atmospheric Environment* **33**, 4877-4900.
- GRIMMOND, C. S. B., T. R. OKE, 1999: Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J. Appl. Meteor.* **38**, 1262-1292.
- GRIMMOND, C. S. B., T. R. OKE, 2002: Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *J. Appl. Meteor.* **41**, 792-810.
- GRIMMOND, C. S. B., T. S. KING, F. D. CROPLEY, D. J. NOWAK, C. SOUCH, 2002: Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution* **116**, 243-254.
- GROß, G., 1987: A numerical study of the air flow within and around a single tree. *Boundary-Layer Meteorology* **40**, 311-327.
- GROß, G., 1996: Stadtklima und globale Erwärmung. *Geowissenschaften* **14**, 245-248.
- HELBIG, A., J. BAUMÜLLER, M. J. KERSCHGENS, 1999: Stadtklima und Luftreinhaltung. *Springer-Verlag*, Berlin, 467 S.
- HERBERT, J. M., R. D. HERBERT, 2002: Simulation of the effects of canyon geometry on thermal climate in city canyons. *Math. Comput. Simul.* **59**, 243-253.
- HÖPPE, P., 1999: The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol.* **43**, 71-75.
- IDSO, C. D., S. B. IDSO, R. C. BALLING JR., 2001: An intensive two-week study of an urban CO₂ dome in Phoenix, Arizona, USA. *Atmospheric Environment* **35**, 995-1000.
- JENDRITZKY, G., 1998: Mapping human bioclimates in various scales with particular reference to urban environment. Prepr. 13th Conference on Biometeorology, Albuquerque, *AMS*, 168-171.

- KASSOMENOS, P., A. N. SKOULOUDIS, S. LYKOUDIS, H. A. FLOCAS, 1999: „Air quality indicators“ for uniform indexing of atmospheric pollution over large metropolitan areas. *Atmospheric Environment* **33**, 1861-1879.
- KRAUS, H., 2001: Die Atmosphäre der Erde. *Springer-Verlag*, Berlin, 470 S.
- KUTTLER, W., 1996: Aspekte der Angewandten Stadtklimatologie. *Geowissenschaften* **14**, 221-228.
- KUTTLER, W., 2002: Local cold air and its significance for the urban climate. Prepr. Fourth Symposium Urban Environment, *AMS*, 56-57.
- KUTTLER, W., T. LAMP, K. WEBER, 2002: Summer air quality over an artificial lake. *Atmospheric Environment* **36**, 5927-5936.
- LEMONSU, A., V. MASSON, 2002: Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Boundary-Layer Meteorology* **104**, 463-490.
- MARTILLI, A., A. CLAPPIER, M. W. ROTACH, 2002: An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology* **104**, 261-304.
- MASSON, V., C. S. B. GRIMMOND, T. R. OKE, 2002: Evaluation of the town energy balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *J. Appl. Meteor.* **41**, 1011-1026.
- MATZARAKIS, A., 2001: Die thermische Komponente des Stadtklimas. *Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg* Nr. **6**, 286 S.
- MATZARAKIS, A., H. MAYER, 1992: Mapping of urban air paths for planning in Munich. *Wiss. Ber. Inst. Meteor. Klimaforsch. Univ. Karlsruhe* Nr. **16**, 13-22.
- MATZARAKIS, A., H. MAYER, 1996: Another kind of environmental stress: thermal stress. *WHO-Newsletter* No. **18**, 7-10.
- MATZARAKIS, A., W. BECKRÖGE, H. MAYER, 1998a: Future perspectives in applied urban climatology. Proc. 2nd Japanese-German Meeting „Klimaanalyse für die Stadtplanung“, Research Center for Urban Safety and Security, *Kobe University, Special Report* No. **1**, 109-122.
- MATZARAKIS, A., J. BAUMÜLLER, H. MAYER, 1998b: International urban climate homepage – a tool for urban planners and urban meteorologists. Prepr. Second Urban Environment Symposium, November 2-6, 1998, Albuquerque, New Mexico, *American Meteorological Society* 174-175.
- MATZARAKIS, A., H. MAYER, M. G. IZIOMON, 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int. J. Biometeorol.* **43**, 76-84.
- MAYER, H., 1993: Urban bioclimatology. *Experientia* **49**, 957-963.
- MAYER, H., 1996: Human-biometeorologische Probleme des Stadtklimas. *Geowissenschaften* **14**, 233-239.
- MAYER, H., 1999: Air pollution in cities. *Atmospheric Environment* **33**, 4029-4037.
- MAYER, H., 2000: Umweltmeteorologie am Beginn eines neuen Jahrhunderts. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **60**, 327-334.
- MAYER, H., F. KALBERLAH, D. AHRENS, U. REUTER, 2002: Analyse von Indizes zur Bewertung der Luft. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **62**, 177-183.
- MESTAYER, P. G., P. DURAND, 2002: The UBL/CLU-ES-COMPTÉ experiment: description and first results. Prepr. Fourth Symposium Urban Environment, *AMS*, 19-20.
- NIKOLOPOULOU, M., N. BAKER, K. STEEMERS, 2001: Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy* **70**, 227-235.
- PICKUP, J., R. DE DEAR, 2000: An outdoor thermal comfort index (OUT-SET*) – Part I – the model and its assumptions. *WCASP-50, WMO/TD-No.* **1026**, 279-283.
- RAGA, G. B., D. BAUMGARDNER, T. CASTRO, A. MARTINEZ-ARROYO, R. NAVARRO-GONZÁLEZ, 2001: Mexico City air quality: a qualitative review of gas and aerosol measurements (1960-2000). *Atmospheric Environment* **35**, 4041-4058.
- ROTACH, M. W., 2002: Overview on the Basel urban boundary layer experiment – BUBBLE. Prepr. Fourth Symposium Urban Environment, *AMS*, 25-26.
- ROULET, C.-A., 2001: Solar energy and global heat balance of a city. *Solar Energy*, **70**, 255-261.
- SCHATZMANN, M., B. LEITL, J. LIEDTKE, 1999: Validierung numerischer Modelle für Ausbreitungssituationen in Stadtgebieten. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **59**, 349-355.
- SCHERER, D., U. FEHRENBACH, H.-D. BEHA, E. PARLOW, 1999: Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment* **33**, 4185-4193.
- SPRONKEN-SMITH, R. A., T. R. OKE, W. P. LOWRY, 2000: Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park. *Int. J. Climatol.* **20**, 1033-1047.
- SVENSSON, M. K., I. ELIASSON, 2002: Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning. *Landscape and Urban Planning* **61**, 37-54.
- SVENSSON, M. K., S. THORSSON, S. LINDQVIST, 2003: A geographical information system model for creating bioclimate maps – examples from a high, mid-latitude city. *Int. J. Biometeorol.* **47**, 102-112.
- THUNIS, P., S. GALMARINI, A. MARTILLI, A. CLAPPIER, S. ANDRONOPOULOS, J. BARTZIS, D. VLACHOGIANNIS, K. DE RIDDER, S. MOUSSIOPOULOS, P. SAHM, R. ALMBAUER, P. STURM, D. OETTL, S. DIERER, K. H. SCHLÜNZEN, 2003: An inter-comparison exercise of mesoscale flow models applied to an ideal case simulation. *Atmospheric Environment* **37**, 363-382.
- VARDOULAKIS, S., B. E. A. FISHER, K. PERICLEOUS, N. GONZALEZ-FLESCA, 2003: Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment* **37**, 155-182.
- WIENERT, U., W. KUTTLER, 2002: Statistical analysis of the dependence of urban heat island intensity on latitude. Prepr. Fourth Symposium Urban Environment, *AMS*, 52-53.
- WMO, 1999: Cities leverage global climate change. WMO media features. <http://www.wmo.ch/web/Press/cities.html>.
- YANNAS, S., 2001: Toward more sustainable cities. *Solar Energy* **70**, 281-294.