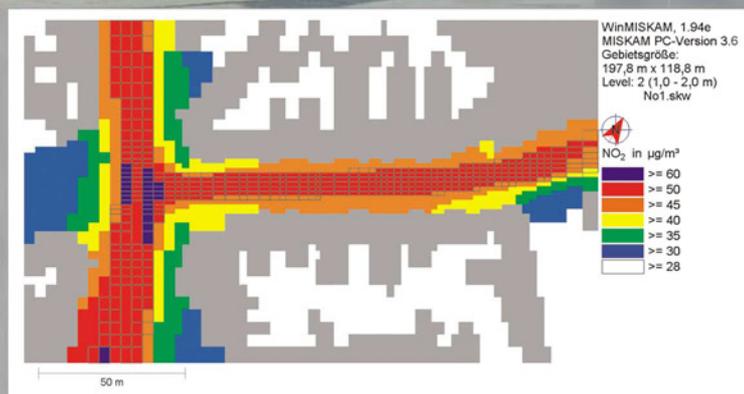




Umweltmeteorologie



W. KUTTLER, D. DÜTEMEYER

2 Umweltmeteorologische Untersuchungsmethoden

1 Einleitung

Die Umweltmeteorologie beschäftigt sich als Teilgebiet der Angewandten Meteorologie mit der Untersuchung der stofflichen und energetischen Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und der Lebensumwelt von Organismen. Hierzu zählen die Analyse der physikalischen und chemischen Zustände und Prozesse der Atmosphäre in ihrer Auswirkung auf den Menschen ebenso, wie die anthropogenen Eingriffe und deren Folgen auf die atmosphärische Umwelt. Ziel der umweltmeteorologischen Forschung ist es somit, Lösungswege zur Vermeidung bzw. Verbesserung von schädlichen Umwelteinflüssen aufzuzeigen. Sie bedient sich dazu einer über den interdisziplinären Ansatz hinausgehenden transdisziplinären Arbeitsweise. Diese erfordert eine entsprechende Untersuchungsmethodik, mit der sich dieser Beitrag – unter Berücksichtigung ausgewählter Beispiele – beschäftigt.

2 Arbeitsgebiete der Umweltmeteorologie

Als anwendungsorientiert ausgerichtetes Fachgebiet, das auf der Grundlagenforschung aufbaut und diese in praxisbezogene Fragestellungen einbindet, befasst sich die Umweltmeteorologie mit einem weitgespannten Spektrum meteorologischer und lufthygienischer Probleme (HELBIG et al. 1999). Zu ihren wichtigsten Gegenständen zählen nach MAYER (2000):

- die Untersuchung dynamischer Vorgänge,
- die Analyse der Emission, Transmission, physikalischen und chemischen Transformation, Immission und Deposition luftgetragener gas- und partikelförmiger sowie feuchter Spurenstoffe,
- die Behandlung biometeorologischer Wirkgrößen sowie
- Untersuchungen zur Nutzung regenerativer Energien.

Das raum-zeitliche Arbeitsgebiet umweltmeteorologischer Untersuchungen umfasst im Wesentlichen die insbesondere während autochthoner Witterung deutlich ausgeprägten atmosphärischen Grenzschichtprozesse des lokalen und regionalen Bereichs, mithin der Mikro- α -, β - und Meso- γ -Skala (HUPFER 1989). Ausgewählte Beispiele hierzu enthält Tab. 2-1. Da sich jedoch die Wirksamkeit lokal freigesetzter Emissionen im Allgemeinen nicht nur auf den Nahbereich beschränkt, sondern in Abhängigkeit von der jeweiligen atmosphärischen Aufenthaltsdauer und spezifischen Klimabeeinflussung auch überregional in Erscheinung treten kann, erweitert sich das Arbeitsspektrum der Umweltmeteorologie gegebenenfalls um den Fernbereich.

Wissenschaftshistorisch betrachtet entwickelte sich die Umweltmeteorologie von einer anfangs eher qualitativ geprägten zu einer quantitativ ausgerichteten Fachdisziplin (vgl. Kap. 1). Hierzu trug die Aufnahme der Planungsfaktoren „Klima“ und „Luft“ in zahlreiche gesetzliche Regelwerke in erheblichem Maße bei (REUTER et al. 1991; siehe Tab. 2-2 und Kap. 5).

3 Messgrößen und Umweltfaktoren

In diesem Beitrag wird einer Aufteilung der genannten umweltmeteorologischen Untersuchungsgegenstände (Tab. 2-1) in meteorologische und lufthygienische Messgrößen der Vorzug gegeben und sich nicht ausschließlich an den physikalischen Basisgrößen sowie den hergeleiteten Größen orientiert. Da Umweltfaktoren die Messgrößen entscheidend beeinflussen, wird hierauf gesondert eingegangen.

3.1 Meteorologische Messgrößen

Zu den meteorologischen Standardmessgrößen zählen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Windgeschwindigkeit und Windrichtung. In speziellen Fällen kann die Messung weiterer Größen notwendig sein. Hierzu gehören: Strahlungstemperatur, Bodentemperatur, kurz- und langwellige Strahlungsströme, Energiebilanz, Verdunstung, atmosphärische Turbulenz, Mischungsschichthöhe, Bewölkung, fallender und abgesetzter Niederschlag, Schlagregen, Nebelart und -häufigkeit, Sichtweite sowie ggf. meteorologisch bedingte Lärmausbreitungen. Auch die Analyse des Klimas in Wohnungen, Büroräumen, Nahverkehrsmitteln und Kraftfahrzeugen kann – mit einer darauf abgestimmten Methodik – Gegenstand umweltmeteorologischer Arbeiten sein (MÜLLER und TETZLAFF 1999, MÜCKE et al. 1992, JAKOBI und FABIAN 1996). Die meisten Messgrößen werden heutzutage mit hinreichender Genauigkeit (zehntel bis hundertstel Maßeinheit) und bei Bedarf mit hoher zeitlicher Auflösung (> 1 Hz) elektronisch erfasst und aufgezeichnet, was insbesondere für die Ermittlung von Stromdichten wichtig ist (FOKEN 1990).

3.2 Lufthygienische Messgrößen

Atmosphärische Inhaltsstoffe können anthropogenen oder natürlichen Ursprungs sein. Im Rahmen von Luftqualitätsüberwachungen werden in der Regel nur diejenigen Substanzen untersucht, denen Indikator-

Umweltmeteorologische Bezugsräume	Untersuchungsgegenstände
Industriegebiete, Verkehrsflächen, Städte	
Gewerbe- / Industriegebiete	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Schlagregen, Spurenstoff- / Lärm- / Geruchsbelastung
Kraftwerke	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoff- / Lärm- / Geruchsbelastung, Nebel- / Glättebildung, Abschattung, Sichtweite
Deponien / Halden / Altlastenflächen	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoff- / Lärm- / Geruchsbelastung
Verkehrswege	Windverhältnisse, Spurenstoff- / Lärmbelastung
Innenstädte	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoff- / Lärmbelastung
Wohngebiete	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Schlagregen, Lärmbelastung
Urbane Grünflächen	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoffbelastung, human-biometeorologische Wohlfahrtswirkungen
Luftleitbahnen	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoffbelastung, Kaltlufttransport, Kühleffekt, Eindringtiefe in Bebauung, human-biometeorologische Wohlfahrtswirkungen, Kaltluftqualität
Land- / Forstwirtschaft	
Landbau, Massentierhaltung	Spurenstoff- / Geruchsbelastung
Waldbau	Strahlungs- / Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, human-biometeorologische Wohlfahrtswirkungen
Sonstiges	
Erholungsgebiete, Heilklimatische Kurorte, Luftkurorte	Luftdruck- / Strahlungs- / Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoff- / Lärm- / Geruchsbelastung, human-biometeorologische Wohlfahrtswirkungen
Bagger- / Stauseen	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Nebel- / Glättebildung, Sichtweite
Regenerative Energien	Strahlungs- / Wind- / Temperaturverhältnisse, Lärm- / Geruchsbelastung (bei Biogas)

Tab. 2-1: Auswahl umweltmeteorologischer Bezugsräume und ihrer Untersuchungsgegenstände (unter Verwendung von SÜSSEN-GUTH 1998, SCHIRMER et al. 1993).

funktionen in Bezug auf entsprechende Quellen bzw. auf vermutete Akzeptorschäden (BImSchG 2002) zukommt.

Das Spektrum der überwiegend gemessenen Spurenstoffe umfasst primäre und sekundäre Luftverunreinigungen (NO, NO₂, O₃, CO, SO₂, Staubbiederschlag, Schwebstaub (PM₁₀, PM_{2,5}) sowie Ruß). Je nach Fra-

gestellung wird der Messumfang um CO₂, anthropogene Kohlenwasserstoffe (AVOC, z. B. BTEX) oder biogene Kohlenwasserstoffe (BVOC, z. B. Isopren, Terpen, usw.) erweitert. Ferner kann die Luftqualität durch Gerüche (Industrie, Intensivtierhaltung, Entsorgungsanlagen) belastet werden, die meist aus einem Gemisch gasförmiger Substanzen bestehen und in summa oder einzeln nachzuweisen sind (vgl. Kapitel 4).

3.3 Umweltfaktoren

Unter Umweltfaktoren werden diejenigen biotischen, abiotischen und anthropogenen Umwelteinflüsse verstanden, die direkt oder indirekt meteorologische bzw. lufthygienische Messgrößen mehr oder weniger stark modifizieren (Tab. 2-3).

Aus den zeitlichen Veränderungen der Umweltfaktoren resultieren singuläre, episodische oder periodische (diurnale, saisonale, annuale) Einflüsse, durch die die Dauer der Messzeiträume bestimmt wird.

4. Untersuchungs- und Messmethoden

4.1 Untersuchungsmethoden

Da das Ziel umweltmeteorologischer Untersuchungen die raum- und zeitabhängige Erfassung meteorologischer bzw. lufthygienischer Größen ist, können sowohl die Analyse der aktuellen Situation als auch die Prognose zukünftiger Verhältnisse – z. B. unter Berücksichtigung raumverändernder Vorhaben – das methodische Vorgehen bestimmen. Grundsätzlich lässt sich eine umweltmeteorologische Untersuchungsmethodik in vier Arbeitsabschnitte untergliedern:

- Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) i. d. F. v. 26.09.2002
- Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft) i. d. F. v. 24.07.2002
- Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) i. d. F. v. 18.06.2002
- Baugesetzbuch (BauGB), i. d. F. v. 23.07.2002
- Baunutzungsverordnung (BauNVO) i. d. F. v. 22.04.1993
- Bau- und Raumordnungsgesetz (BauROG) i. d. F. v. 31.12.2001
- Raumordnungsverordnung (ROV) vom 13.12.1990
- Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), i. d. F. v. 25.03.2002 (BNatSchGNeuRegG)
- Bundeswaldgesetz (BWaldG) i. d. F. v. 29.10.2001
- Umweltgesetzbuch (UGB) v. 09.09.1997

Tab. 2-2: Berücksichtigung der Planungsfaktoren „Klima“ und „Luft“ in verschiedenen deutschen gesetzlichen Regelwerken.

Typ	Merkmale
Relief	Geographische Lage (Ebene, Tal, Hang), Höhenlage (absolut, relativ), Reliefenergie, Hangexposition, Hangneigung, Horizontüberhöhung, Rauigkeit
Boden	Nutzung, Typ, Art, Struktur, Farbe, Bedeckung (Staub, Laub, Schnee), Feuchtigkeit, Höhe des Grundwasserspiegels, Bewirtschaftungsform, Rauigkeit
Vegetation	Art, Dichte, Bestandsstruktur, saisonaler Aspekt, Blattflächenindex (BFI/LAI ¹) bzw. Gesamtflächenindex (PAI ¹), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI ²), Ratio Vegetation Index (RVI ²), Biogene Kohlenwasserstoffemissionen (BVOC ³), Rauigkeit
Bebaute Gebiete	Grund-/Aufriss, Rauigkeit, thermophysikalische Materialeigenschaften, Versiegelungsgrad, Bebauungs-/Straßengeometrie, Oberflächenfarbe, Horizontüberhöhung (Himmelssichtfaktor SVF ⁴ , Straßenbreiten-/Haushöhenverhältnis), Hindernishöhen/Zwischenraum-Verhältnis (Aspect ratio ⁵)
Anthropogene Emissionssituation	Quellentypen, -höhe, Emissionszusammensetzung, raum-zeitliche Emissionsmuster (z. B. Heizverhalten, Verkehrsdichte, Fahrverhalten, industrielle Produktionszyklen, Bewirtschaftungszyklen landwirtschaftlicher Nutzflächen, Massentierhaltung, usw.)

¹) LAI = Leaf Area Index, PAI = Plant Area Index (Oberfläche des gesamten pflanzlichen Kormus, vgl. LARCHER 2001); ²) vgl. z.B. BOLLE (1990), GALLO et al. (1993); ³) RAPPENGLÜCK et al. (1999); ⁴) SVF = Sky View Factor (vgl. z.B. HOLMER 1992); ⁵) vgl. OKE 1999.

Tab. 2-3: Typen und Merkmale von Umweltfaktoren.

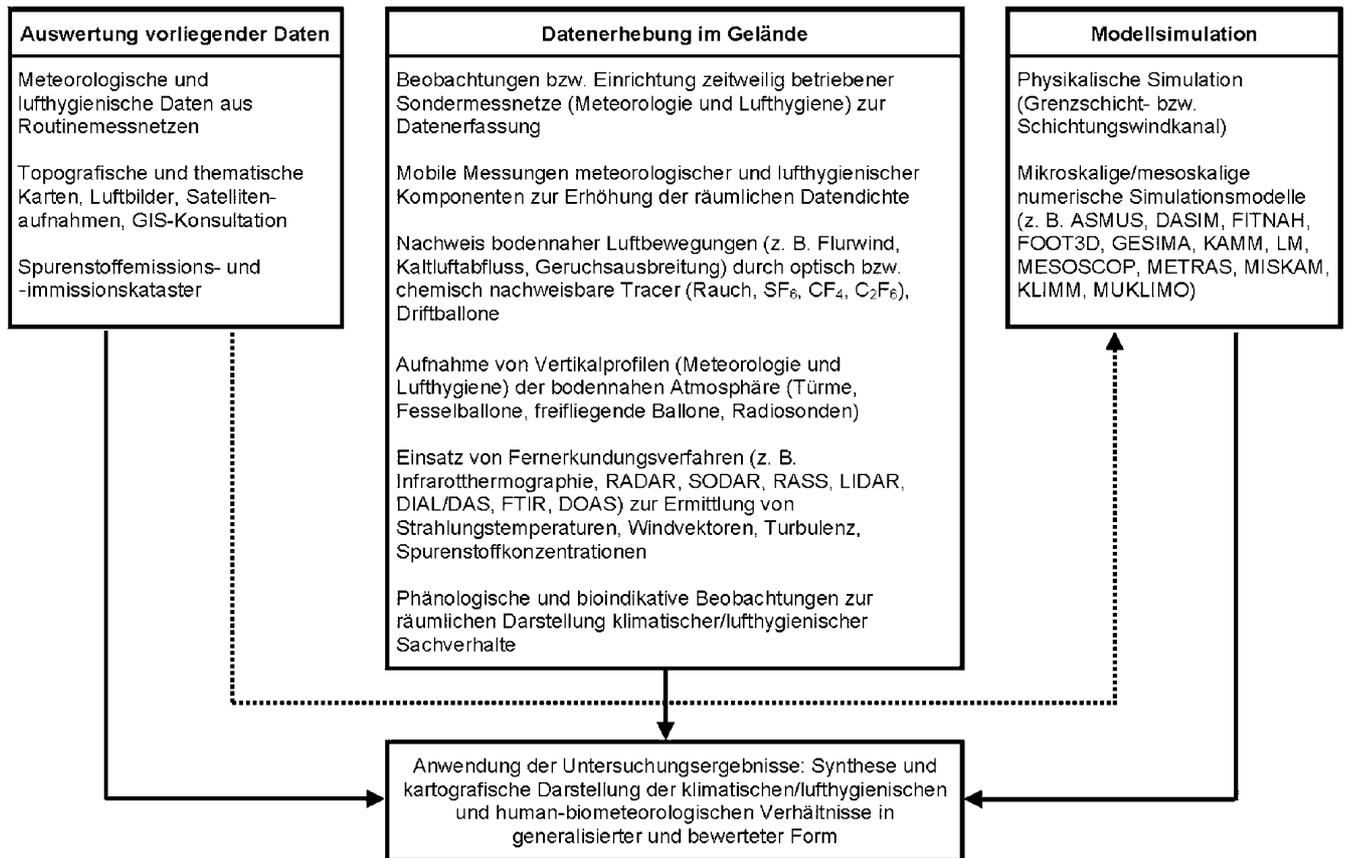


Abb. 2-1: Umweltmeteorologische Untersuchungsmethoden (nach VDI RL 3787, Bl. 9, verändert).

- Fachwissenschaftliche Auswertung vorhandenen Datenmaterials,
- Datenerhebung im Gelände durch *In Situ*-Messungen und Beobachtung bzw. Einsatz von Fernerkundungsverfahren sowie Phänologie und Bioindikation,
- Anwendung physikalischer bzw. numerischer Modellsimulationen zur Diagnose und Prognose sowie
- Bewertung der Ergebnisse.

Die Fragestellung und letztlich auch der zur Verfügung stehende Zeit- und Finanzrahmen entscheiden jeweils darüber, welche der genannten Untersuchungsschritte zur Problemlösung herangezogen werden (Abb. 2-1). Abschließend hat in jedem Fall neben einer Quantifizierung der Ergebnisse auch eine darauf basierende fachwissenschaftliche Bewertung zu erfolgen.

Zur Entscheidung, ob Datenerhebungen im Gelände oder Modellsimulationen durchgeführt werden sollen, sind für den Abwägungsprozess die Vor- bzw. Nachteile beider Verfahren zu berücksichtigen (MANIER 1998): Geländemessungen besitzen u. a. den Vorteil, dass ortsbezogene Messwerte mit hoher zeitlicher Auflösung generiert werden können. Wurden im Untersuchungsgebiet mehrere Messstationen eingerichtet, können über singuläre Standortwerte hinaus raumzeitliche Mittelwerte gebildet werden, die jedoch nur eine geringe räumliche Repräsentativität aufweisen,

darüber hinaus dreidimensional nur unzureichend aufgelöst sind – was besonders in reliefiertem Gebiet zu Verständnisproblemen führen kann – und ferner keine Prognosefähigkeit besitzen.

Die unbestreitbaren Vorteile der Anwendung physikalischer oder numerischer Modellsimulationen hingegen liegen in der Darstellung meist hochaufgelöster dreidimensionaler Datenfelder, woraus Raumausagen abgeleitet werden können, und in der Erstellung von Prognosen, die verschiedene Szenarien berücksichtigen können (vgl. Kap. 3). Der Nachteil des Einsatzes von Modellsimulationen ist allerdings darin zu sehen, dass viele der verwendeten Größen parameterisiert werden müssen und deshalb nur ein unvollkommenes Bild der Realität widerspiegeln. Ferner ist die räumliche Auflösung der Modelle begrenzt.

Untersuchungen im Gelände können ggf. durch die Anwendung indirekter *In-situ*-Verfahren, wie Phänologie und Bioindikation (Abschn. 4.3), ergänzt werden.

4.2 Messmethoden

Die Erfassung meteorologischer Messgrößen und atmosphärischer Spurenstoffe kann sowohl durch *In situ*- als auch durch Fernerkundungsverfahren erfolgen. Diesbezüglich ist jedoch bei einigen der nachfol-

gend beschriebenen Verfahren eine eindeutige Zuordnung nicht immer möglich. Während die Anwendung von Vor-Ort-Messungen standortbezogene Messwerte liefert, beziehen sich die Ergebnisse von Fernerkundungsmessungen verfahrensbedingt nicht auf Einzelpunkte, sondern auf Messstrecken, Volumina oder Flächen. Einen Überblick über die verschiedenen Messverfahren geben z.B. EMEIS (2000) und FOKEN (2003). Dezierte Messanweisungen sind darüber hinaus entsprechenden VDI-Richtlinien (<http://www.vdi.de/vdi/vrp/richtliniensuche/index.php>) zu entnehmen. Olfaktometrische Messungen erfolgen nicht nur unter Zuhilfenahme des menschlichen Geruchssinns (VDI 3788, Blatt 1, VDI 3881, Blatt 1 bis 4), sondern seit einiger Zeit auch durch Einsatz elektronischer Sensoren (HEINING und WIESE 1999) (vgl. Kap. 4).

4.2.1 Geländemessungen

Sind Messungen im Gelände vorgesehen, ist unter Berücksichtigung der Fragestellung vorab festzulegen, welche Messgrößen an welchen Standorten, über welcher Oberfläche, in welcher Höhe über Grund, mit welchen Instrumenten und in welcher zeitlichen Auflösung über welchen Zeitraum erfasst werden müssen (REUTER und HOFFMANN 1998). Die Fragestellung entscheidet über die Größen, die nach dem Stand der Technik gemessen oder mit Hilfe von Modellsimulationen dargestellt werden (BAUMÜLLER 1999). Das gilt gleichermaßen für die Erfassung der meteorologischen Elemente wie auch für die Ermittlung von Luftqualitätsindikatoren.

Bei der Analyse von Geländedaten muss grundsätzlich berücksichtigt werden, dass es sich um integrierte Werte handelt, die sich aus einer regionalen (Hintergrundwert) und lokalen Komponente (ortsspezifischer Wert) zusammensetzen (LOWRY 1977). Eine Aufschlüsselung der beiden Anteile ist schwierig und nicht ohne weiteres möglich.

4.2.1.1 Stationäre Messungen

Zur stationären Datenerfassung ist es i. d. R. notwendig, im Untersuchungsraum eine oder mehrere Messstationen (Temporärstationen, Abb. 2-2) einzurichten, da die Messnetze der staatlichen bzw. privaten Wetterdienste (im Falle meteorologischer Messungen) oder der Umweltämter (im Falle hauptsächlich lufthygienischer Messungen) aufgabenbezogen im Allgemeinen eine nur geringe räumliche Stationsdichte aufweisen. Allerdings sind die Daten nahe gelegener Dauermessstellen nach Möglichkeit mit auszuwerten, um die temporär gewonnenen Werte an längere Reihen anbinden bzw. mit diesen in Beziehung setzen zu können. Die Einrichtung von Temporärmessnetzen zielt darauf ab, lokalklimatische Besonderheiten insbesondere während autochthoner Witterungsbedingungen zu erfassen.

Da meist aus finanziellen Gründen die Anzahl von Temporärstationen begrenzt wird, teilt man ein Untersuchungsgebiet in möglichst wenige, durch dominierende Umweltfaktoren (vgl. Tab. 2-3) geprägte, repräsentative Flächeneinheiten auf. Derartig generalisierte räumliche Einheiten nennt man „Klimatope“ bzw. „Aerotope“ (SCHERER et al. 1999). Sie werden durch annähernd homogene Mikroklimata respektive lufthygienische Verhältnisse gekennzeichnet (VDI 3787, Blatt 1). Im englischen Sprachgebrauch wird unter besonderer Berücksichtigung des städtischen Siedlungsraumes hierfür der Begriff *Urban Terrain Zone* (UTZ) (ELLEFSSEN 1990/91) verwendet.

Vor der Aufnahme meteorologischer Messungen muss entschieden werden, ob zur Charakterisierung eines Klimatops grundsätzlich über einheitlicher Oberfläche (z. B. kurz gehaltenem Rasen) gemessen werden soll oder die Messstationen auf den jeweils vorgegebenen Oberflächen zu errichten sind. So ist insbesondere für Stadtgebiete mit ihrer hohen Versiegelung zu diskutieren, ob in den verschiedenen städtischen Klimatopen Messungen auf einheitlich grasbestandenen Flächen überhaupt sinnvoll sind. Bei Messungen über Oberflächen mit unterschiedlichem Versiegelungsgrad stellt sich jedoch die Frage nach der anschließenden Ver-



Abb. 2-2: Umweltmeteorologische Messstation zur Erfassung der Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, des Windes und verschiedener Energiebilanzglieder in unterschiedlichen Messhöhen (Foto: Kuttler).

gleichbarkeit der Ergebnisse. Hier besteht seitens der Umweltmeteorologie erheblicher Klärungsbedarf, denn bisher existieren weder auf nationaler noch internationaler Ebene Empfehlungen zur Erfassung „repräsentativer“ lokalklimatischer Messgrößen in heterogenen Flächennutzungen. Erste Überlegungen hierzu wurden zwar bereits in den 1970er Jahren publiziert (VAN GYSEGEM 1978) und zwischenzeitlich wieder aufgegriffen (OKE 1999), eine dezidierte Handlungsanweisung für die Umweltmeteorologie resultiert hieraus jedoch noch nicht.

In diesem Zusammenhang ist auch zu klären, in welcher Höhe über Grund Messungen vorgenommen werden sollen, da je nach Fragestellung möglicherweise von den jeweiligen Standardmesshöhen abgewichen werden muss. So kann es sich in städtisch versiegeltem Gebiet als notwendig erweisen, neben Messungen in Bodennähe auch solche in Dachhöhe oder, wenn Kaltluftdynamik in topographisch gegliedertem Gelände zu erfassen ist (VDI 3787, Blatt 5), Wind- und Temperaturmessungen in gleichen Höhen – eventuell auch nahe der Erdoberfläche – vorzunehmen.

Zum Nachweis der Luftqualität werden aktive und passive Probennahmeverfahren eingesetzt (MORISKE 2000). *Aktive Verfahren* zeichnen sich dadurch aus, dass Luft mittels einer Pumpe durch ein Messgerät geleitet wird. Unterschieden werden dabei kontinuierliche Messungen, die aus einer selbstständig erfolgenden Probennahme, analytischen Bestimmung sowie anschließender Messwerterzeugung vor Ort bestehen, von diskontinuierlichen Verfahren, bei denen die Probennahme von der Analyse getrennt ist (VDI 4280, Blatt 1). Mit Hilfe von *Passivverfahren* werden gas- oder partikelförmige „Immissionsraten“ bestimmt. Die zeitliche Auflösung ist bei kontinuierlichen Messverfahren von der Einstellzeit (Summe aus Totzeit und 90 %-Zeit) und der Nachweisgrenze der Analytoren, bei diskontinuierlichen und Passivsammlerverfahren von der Art der Probennahme abhängig. Da sich die Messdauer bei nicht registrierenden Geräten im Allgemeinen über mehrere Tage erstreckt, ist eine Verknüpfung der lufthygienischen mit meteorologischen Daten kaum möglich.

Luftgetragene Mikroorganismen (z. B. Schimmelpilze) werden abweichend von den genannten Verfahren mittels geeigneter Filter bzw. ‚Impinger‘ erfasst, wobei das Filtergut anschließend entsprechenden Nährböden ausgesetzt wird, bevor es zur Analyse gelangt (VDI 4242, Blatt 2; VDI 4253, Blatt 2).

Temporäre kontinuierliche Immissionsmessungen erfordern in der Regel einen hohen apparativen, logistischen und damit kostenintensiven Aufwand. Sie werden deshalb seltener eingesetzt als diskontinuierliche Verfahren, die zwar wesentlich kostengünstiger, aus den o. g. Gründen jedoch auch ungenauer sind. Die Festlegung der räumlichen Dichte von Immissions-

messstellen basiert im wesentlichen auf einer Orientierung am geographischen Koordinatensystem, wengleich besondere Emissionsquellen (z. B. stark befahrene Straßen) zu Abweichungen von der starren Einteilung führen können (LARSEN 1998).

Ein grundsätzliches Problem der Messwerterfassung mit Hilfe von Einzelstationen stellt die räumliche Repräsentanz der Daten dar. Um flächenhafte Aussagen zu generieren, sind weitere Methoden (z. B. numerische Modellierung, mobile Messwerterfassung) anzuwenden.

4.2.1.2 Mobile Messungen

Mobile Messungen dienen der flächenhaften Verdichtung punktuell erhobener Daten. Während diese im Rahmen stadt- und geländeklimatischer Analysen – insbesondere zum Nachweis der Lufttemperatur und auch der Luftfeuchtigkeit – schon seit langer Zeit Bestandteil der anwendungsorientierten Forschung sind (PERSSON 1997), werden lufthygienische Messfahrten und mobile Messungen ausgewählter Strahlungsgrößen erst seit einigen Jahren erfolgreich durchgeführt (MAYER und HAUSTEIN 1994, KUTTLER und STRASSBURGER 1999, BLANKENSTEIN und KUTTLER 2003).

Im Vergleich zu stationären Messungen zeichnen sich mobile Messungen durch eine geringe zeitliche, jedoch hohe räumliche Auflösung aus. Sie sind deshalb eher geeignet, Größen zu erfassen, die räumlich inhomogen verteilt sind.

Mobile Messungen erfolgen meist während schwachwindiger Strahlungswetterlagen, da in diesen Fällen die lokalen Effekte besonders hervortreten. Der Weg führt durch repräsentative Flächennutzungen entlang vorher festgelegter Routen. Die Messstrecken werden entweder mit geeigneten Fahrzeugen (Abb. 2-3) bei geringer Geschwindigkeit befahren oder auch mit entsprechender Messausrüstung – im Falle meteorologischer Untersuchungen – begangen (Messgänge). Die räumliche Datendichte ist sowohl vom Verlauf der Messroute und der Ansprechgeschwindigkeit der Erfassungsgeräte als auch von der Geschwindigkeit abhängig, mit der das Analysegerät durch das Untersuchungsgebiet bewegt wird.

Eine hohe zeitliche Auflösung wird durch die Messsysteme mit Erfassungsfrequenzen von 1 Hz bereits vielfach garantiert. Bei längeren Messzeiträumen ist die tageszeitliche Variabilität übergeordneter Effekte (z. B. Tagesgang der Temperatur) durch geeignete Korrekturverfahren zu kompensieren (DANZEISEN 1983). Die geringe zeitliche Repräsentativität kann durch Wiederholungsmessungen erhöht werden. Erfolgt die räumliche Zuordnung der Messdaten durch den Einsatz von Global Positioning Systemen, ist eine unmittelbare digitale Weiterverarbeitung gewährleistet.

Die Daten können mit Hilfe einfacher Interpolationsverfahren bzw. durch numerische Modellierung zu flächendeckenden Karten weiter verarbeitet werden. Auch besteht die Möglichkeit, für vorherrschende Flächennutzungstypen Mittelwerte anzugeben (Abb. 2-4) oder diese in Form von Liniensignaturen kartografisch darzustellen.

4.2.1.3 Vertikalsondierungen

Vertikalsondierungen dienen zur Erfassung der meteorologischen und lufthygienischen Verhältnisse in Abhängigkeit von der Höhe über Grund. Hierzu bedient man sich direkter oder indirekter (vgl. Abschnitt 4.2.2) Messverfahren. Direkte Messungen können an Türmen, freifliegenden Ballonen, Fesselballonen, Zeppelinen, Hubschraubern oder Flugzeugen vorgenommen werden, wobei aus Kostengründen relativ häufig auf den Einsatz von Fesselballonen zurückgegriffen wird (BAUMBACH und VOGT 1999).

Darüber hinaus lassen sich Fesselballone als „mobile Messmasten“ (*meteorological towers*) einsetzen, wenn das Halteseil des Trägerballons bei voreingestellter Flughöhe mehrere Instrumente in zuvor festgelegten Höhenstufen trägt. Diese und die an Türmen vorgenommenen Messungen erlauben kontinuierliche Untersuchungen. Sie sind jedoch, im Vergleich zu anderen Messgeräteträgern, räumlich nicht bzw. nur eingeschränkt variabel verwendbar.

Der Einsatz von Zeppelinen, Hubschraubern oder Flugzeugen bietet sich an, wenn ein größeres Areal in der vertikalen Struktur untersucht werden soll, oder wenn die zu untersuchenden Messgrößen aufgrund der Instrumentengewichte den Einsatz von Ballonen verhindern.



Abb. 2-3: Mobiles meteorologisch-lufthygienisches Labor der Abteilung Angewandte Klimatologie der Universität Duisburg-Essen. Messgrößen: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, Luftdruck, UV- und Globalstrahlung, NO, NO₂, CO₂, O₃, VOC (Foto: Kuttler).

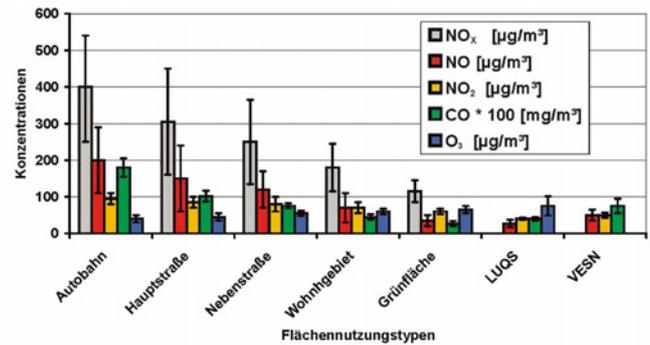


Abb. 2-4: Mittlere Spurenstoffkonzentrationen und Standardabweichungen für verschiedene Flächennutzungstypen im mittleren Ruhrgebiet (nach KUTTNER und WACKER 2001). Datengrundlage: 16 Lufthygienische Profilmessfahrten (jeweils zwischen 9 und 16 Uhr MEZ am 21.2.; 6., 7., 25., 28.4.; 4., 13.5.; 20., 27., 30.6.; 1., 7., 22., 23., 24./25.8.2000; 12.1.2001, überwiegend bei windschwacher antizyklonaler Witterung) sowie zeitgleiche LUQS-Daten (Mittel aus 6 Stationen) des Landesumweltamtes NRW, VESN = Verkehrsnahe LUQS-Station.



Abb. 2-5: Visualisierung der Kaltluftausbreitung mit Hilfe von Raucherzeugern. Man beachte die in der linken Bildhälfte erkennbare gegenläufige Ausgleichsströmung an der Oberseite der Rauchfahne (Foto: Kuttler).

4.2.1.4 Tracerexperimente

Tracer sind luftfremde Spurenstoffe, die im Rahmen emittentenbezogener Untersuchungen zum Nachweis der Windbewegung, insbesondere von Schwachwindströmungen, bei Kaltluftuntersuchungen und Geruchsausbreitungen eingesetzt werden (EGGERT 1999, RÖCKLE et al. 1998, WEBER und KUTTNER 2003a, b). Es handelt sich dabei sowohl um optische Tracer, wie Raucherzeuger (Abb. 2-5), als auch um chemisch nachzuweisende Spurenstoffe, die in der Atmosphäre nicht oder nur in geringen Konzentrationen enthalten sind (z. B. Schwefelhexafluorid SF_6 , Tetrafluormethan CF_4 , Hexafluorethan C_2F_6). Die Anwendung von Raucherzeugern hat den Nachteil, dass diese nur visuell und damit qualitativ nachgewiesen werden können. Die Markierungsstoffe SF_6 , CF_4 und C_2F_6 können darüber hinaus zum quantitativen Nachweis herangezogen werden. Sie sind jedoch nur mit großem apparativen Aufwand entweder diskontinuierlich (Probennahme mittels Sammelbehälter und späterer Analyse) oder quasikontinuierlich (sofortige Analyse im Gelände) gaschromatografisch zu ermitteln (KUTTNER 1996). Die genannten chemisch nachzuweisenden Tracer besitzen ein z. T. hohes Treibhauspotenzial. Ihre Freisetzung sollte deshalb sparsam erfolgen. Durch Einsatz von Multitracertechniken können innerhalb eines Untersuchungsgebietes z. B. unterschiedliche Luftströmungen durch gleichzeitige Verwendung verschiedener Tracersubstanzen erfasst werden (RÜHLING und LOHMEYER 1999).

Im Rahmen von Windkanaluntersuchungen werden Tracer auch verwendet, wenn die Verteilung von Luftschadstoffkonzentrationen untersucht werden soll.

4.2.2 Fernerkundungsverfahren

Im Vergleich zu *In Situ*-Messungen handelt es sich bei der Fernerkundung um ein berührungsloses Messverfahren, das sich weder durch Probennahme und -aufbereitung noch durch Beeinflussung des Probenvolumens durch das Messsystem auszeichnet. Dieses Verfahren beruht auf der Wechselwirkung von Schallwellen oder elektromagnetischer Strahlung verschiedener Wellenlängen mit festen, flüssigen bzw. gasförmigen Bestandteilen der Atmosphäre oder dem Erdboden (LORENZ 1990). Bei der Anwendung der elektromagnetischen Verfahren wird zur Erfassung der zu untersuchenden Größen deren Reflexions- oder Strahlungsverhalten genutzt, wobei passive von aktiven Anwendungen unterschieden werden, je nachdem, ob die zu untersuchenden Gegenstände Strahlung emittieren oder reflektieren. Der Einsatz von Fernerkundungsverfahren kann vom Boden, Flugzeug oder Satelliten aus erfolgen (Überblick in Tab. 2-4). Bodengestützte Messungen bieten im Gegensatz zu luft- oder weltraumgestützten Verfahren den Vorteil, dass sie kontinuierlich eingesetzt werden können.

Die bodengestützten Verfahren dienen routinemäßig zur Vertikalsondierung verschiedener meteorologischer und lufthygienischer Messgrößen. In Einzelfällen können auch horizontale Messungen vorgenommen werden (LAMP 2002). Im Vergleich zu Ballonsondierungen bieten fernerkundungsgestützte Vertikalsondierungen grundsätzlich den Vorteil einer höheren zeitlichen Auflösung sowie kontinuierlichen Messung der einzelnen Parameter. Akustische Verfahren haben allerdings den Nachteil, dass sie einerseits Schall emittieren (in bewohnten Gebieten problematisch), andererseits Umweltlärm die Messwertgüte beeinflusst.

Werden Fernmessverfahren zum Nachweis atmosphärischer Spurenstoffe eingesetzt (Beispiel siehe Abb. 2-6), greifen diese auf unterschiedliche Spektralbereiche (UV, VIS und/oder IR) zurück. Die Anwendung erfolgt entweder wegstreckenintegrierend oder orts aufgelöst entlang eines Messstrahls. Diese Messverfahren bieten insbesondere bei der Untersuchung räumlich ausgedehnter und diffuser Spurenstoffquellen Vorteile, da durch das größere Probevolumen ein Dominieren kleinräumiger Inhomogenitäten innerhalb der Messstrecke vermieden wird. Darüber hinaus können mit einem Messsystem gleichzeitig verschiedene Komponenten in demselben Probevolumen bestimmt werden. Den Vorteilen stehen bei einigen Verfahren als Nachteile hohe Investitionen sowie ein relativ großer Aufwand bei der Durchführung der Messungen gegenüber.

Neben den bodengestützten Fernmessverfahren können auch Satelliten und Flugzeuge mit entsprechenden Messgeräten ausgerüstet und zur Erkundung der Atmosphäre und der Erdoberfläche herangezogen werden (AVHRR, MSS, VISSR). Die kurzwellige Reflexstrahlung erlaubt z. B. neben der Wolkenlokalisierung auch die Bestimmung der Erdoberflächenalbedo, klares Wetter vorausgesetzt. Über Kanäle, die im langwelligen Bereich arbeiten, kann z. B. die Strahlungstemperatur der Wolken oder auch die der Erdoberfläche bestimmt werden. Lufthygienische Untersuchungen oder Trübungs-



Abb. 2-6: Optische Fernerkundungssysteme DOAS (auf dem Fahrzeug) und FTIR (neben dem Fahrzeug) zur horizontalen Erfassung lufthygienischer Komponenten (vgl. Tab. 2-4) (Foto: Lamp).

messungen können vom Flugzeug oder Satelliten mit Hilfe des LIDAR-Verfahrens durchgeführt werden.

4.2.3 Modellsimulationen

Modellsimulationen werden ergänzend zu den bisher genannten Untersuchungsmethoden herangezogen, wenn entweder im Rahmen einer Diagnose die Bewertung von geschlossenen dreidimensionalen Feldern meteorologischer und lufthygienischer Verhältnisse oder eine Prognose potentieller Auswirkungen geplanter Umwelteingriffe vorgenommen werden sollen.

Unterschieden werden numerische von physikalischen Modellsimulationen. Da in Kapitel 3 ausführlich auf diese Untersuchungsmethodik eingegangen wird, soll hier nur ein Überblick gegeben werden.

Im Rahmen der numerischen Modellierung werden sowohl mikro- als auch mesoskalige Modelle verwendet (KERSCHGENS 1999). Jüngste Modellgenerationen berücksichtigen bei der Ausbreitungssimulation neben den übergeordneten Windverhältnissen auch potentielle chemische Spurenstoffreaktionen in der Atmosphäre sowie heterogene Flächennutzungsstrukturen und das Relief (SCHLÜNZEN 2002).

Den Vorteilen bei der Anwendung numerischer Modelle stehen auch Nachteile gegenüber. Dazu zählen, dass sie eine begrenzte räumliche Auflösung haben und die Realität aufgrund unvollkommener Gleichungssysteme nicht vollständig und

Verfahren	Messeigenschaften	Messgrößen	Literatur
	P = Prinzip A = maximale räumliche Auflösung/ Reichweite	M = Meteorologie L = Lufthygiene F = Umweltfaktoren	
Bodengestützt			
SODAR (Sonic Detection And Ranging)	P: akustisch A: ca. 20 m / ca. 40-600 m (nach VDI)	M: 3D-Windvektor, Turbulenz L: Keine F: Keine	VDI 3786 Bl. 11, PETERS 1991, REITEBUCH et al. 2000
RASS (Radio Acoustic Sounding System)	P: akustisch/elektromagnetisch A: ca. 20 m / ca. 40-600 m	M: Virtuelle Temperatur, Schichtung L: Keine F: Keine	ENGELBERT et al. 1996
WPR (Windprofiler RADAR)	P: elektromagnetisch (Mikrowellen) A: ca. 100 m / ca. 10 km	M: 3D-Windvektor, Turbulenz L: Keine F: Keine	
RADAR (Radio Detection And Ranging)	P: elektromagnetisch (Mikrowellen) A: < 1 km / ca. 200 km	M: 3D-Windvektor, Turbulenz, Niederschlag L: Keine F: Keine	CLIFF 1985, DOVIK & ZRNIC 1993
LIDAR (Light Detection And Ranging), LDA (Laser Doppler Anemometer), DIAL (Differentielles Absorptions LIDAR), DAS-LIDAR (Differentielle Absorption und Streuung)	P: elektromagnetisch (Ultraviolett, sichtbares Licht oder Infrarot) A: ca. 10 - 30 m / ca. 3 km (DIAL, DAS-LIDAR)	M: 3D-Windvektor, Turbulenz, Wasserdampfkonzentration L: Anorganika, arom. & halogenierte Kohlenwasserstoffe, Alkane, Aldehyde, u. a. F: Keine	VDI 3786 Bl. 14, VDI 3786 Bl. 15 (Entwurf), VDI 4210 Bl. 1, SVANBERG 1994, MEASURES 1984, HOFF & MC CANN 2002
FTIR (Fourier-Transformations-Infrarot Spektroskopie)	P: elektromagnetisch (Infrarot) A: integrierend / < 1 km	M: Wasserdampfkonzentration L: IR-aktive Gase: Anorganika, arom. & halogenierte Kohlenwasserstoffe, Alkane, Alkene, Aldehyde, Ketone, Alkohole, Ester F: Keine	VDI 4211 Bl. 1, RUSSWURM und CHILDERS 1999, KUTTLER et al. 2002, WEBER et al. 1999
DOAS (Differentielle optische Absorptionsspektroskopie)	P: elektromagnetisch (Ultraviolett, sichtbares Licht oder Infrarot) A: integrierend / < 2 km	M: keine L: Anorganika, arom. & halogenierte Kohlenwasserstoffe, Alkane, Aldehyde, u. a. F: Keine	PLATT 1994, LAMP 2002
TDL (Tunable Diode Laser Spektroskopie)	P: elektromagnetisch (Infrarot) A: integrierend / < 1 km	M: keine L: IR-aktive Gase: CO, CO ₂ , CH ₄ , u.a. F: Keine	SCHIFF et al. 1994
Satelliten- und luftgestützt			
AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)/ MSS (Multispectral Scanner)/ GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)	P: elektromagnetisch (multispektral) A: < 500 m / 10 ² - 10 ⁵ km	M: Bewölkung, Luftfeuchtigkeit, langwellige Ausstrahlung L: Aerosole, O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , HCOH, u. a.. F: Albedo, Landnutzung, NDVI, RVI	BURROWS et al. 1999.
IR (Infrared)	P: elektromagnetisch (Infrarot) A: Satellit: < 500 m, / 10 ² - 10 ⁵ km Flugzeug: < 10 m / 10 ² - 10 ³ m	M: Bewölkung, Luftfeuchtigkeit, langwellige Ausstrahlung, Oberflächenstrahlungstemperatur L: keine ? F: Landnutzung, NDVI, RVI	PARLOW 1999
VIS (Visible Light)	P: elektromagnetisch (Sichtbares Licht): A: < 500 m / 10 ² -10 ⁵ km	M: Bewölkung L: Aerosole F: kurzwellige Albedo	PARLOW 1999, HOFF & MC CANN 2002
VISSR (Visible/IR-Scan Radiometer)	P: elektromagnetisch (Sichtbares Licht, Infrarot): A: < 500 m / 10 ² - 10 ⁵ km	M: Bewölkung, Luftfeuchtigkeit, langwellige Ausstrahlung L: Aerosole F: Oberflächenstrahlungstemperatur, Landnutzung, NDVI, RVI	DLR 2002
SAR (Synthetic Aperture Radar)	P: elektromagnetisch (Mikrowelle): A: < 500 m / 10 ² - 10 ⁵ km	M: Keine L: keine F: Rauigkeit, Landnutzung	DLR 2002

Tab. 2-4:

Beispiele umweltmeteorologisch relevanter Fernerkundungsverfahren (Zahlenangaben in typischen Größenordnungen, Abweichungen in speziellen Anwendungen möglich).

damit nur über erforderliche Parameterisierungen widerspiegeln können. Dieses hat zur Folge, dass einerseits zur Generierung der Modellatmosphäre Eingangsdaten bereitgestellt werden müssen, die idealerweise aus Messungen im betreffenden Untersuchungsraum stammen und dass andererseits die Modellergebnisse gleichfalls durch Messungen in natura verifiziert werden sollten (z. B. TETZLAFF et al. 1999).

Physikalische Modelle (Anwendung in Windkanälen) werden eingesetzt, wenn detailgetreue Analysen in einem Untersuchungsgebiet z. B. zur Strömungsdynamik, Ausbreitung von Luftverunreinigungen und zur Klärung human-biometeorologischer Probleme durchzuführen sind oder Fragen der Windlast und des Windkomforts geklärt werden sollen (BÄCHLIN und THEURER 1995, PLATE 1996, PAVAGEAU und SCHATZMANN 1999).

Im Vergleich zu numerischen Modellen sind als Nachteile der Windkanalmodellierung die nur eingeschränkten Möglichkeiten zur Untersuchung von Schwachwindströmungen, unterschiedlichen atmosphärischen Schichtungen, Feuchtefeldern und zeitlichen Zustandsänderungen meteorologischer Parameter zu nennen (GROSS 1999, BRECHLING 1999).

Zu den Modellanwendungen sind letztlich auch empirisch-statistische Verfahren zu zählen, bei denen die atmosphärische Umwelt nicht räumlich simuliert, sondern der Atmosphärenzustand – basierend auf den Umweltfaktoren – integrierend im Sinne eines Gesamtergebnisses aus empirischen Beziehungen berechnet wird (z. B. DÜTEMEYER 2000, WIENERT 2002).

4.3 Phänologie und Bioindikation

Ergänzend zu den physikalischen Messungen und zu Modellsimulationen wird die Pflanzenphänologie – seltener die Tierphänologie – als indirekte Methode zur räumlichen Differenzierung des Klimas herangezogen (SCHNELLE 1955). Da die Klimaelemente in ihrer Gesamtheit auf das Pflanzenwachstum wirken, lassen die Ergebnisse phänologischer Untersuchungen keinen Rückschluss auf einen bestimmenden Faktor zu, sondern spiegeln die integrierende Wirkung aller wirksamen Klimaeinflüsse eines Standortes flächenhaft wider. Die phänologische Methode wird nicht nur zur kleinklimatischen Differenzierung verwendet, sondern auch zum Nachweis von Klimaänderungen eingesetzt (CHMIELEWSKI und RÖTZER 2002).

Eine weitere Möglichkeit, die Umweltqualität anhand von Organismen zu bestimmen, besteht in der Anwendung von Bioindikatoren. Hierzu werden hauptsächlich Pflanzen eingesetzt, die in ihrer Reaktionsnorm und ökologischen Valenz auf Umweltfaktoren, z. B. auf bestimmte Luftverunreinigungen, reagieren, und als qualitativer Maßstab zur Angabe der Luftqualität verwendet werden können. Unterschieden werden „passive“

von „aktiven“ Bioindikatoren, wobei die erstgenannten in der natürlichen Umwelt vorkommen, die letztgenannten hingegen jeweils im Untersuchungsgebiet exponiert werden müssen (VDI 3957, Blatt 1).

5 Bewertung und Darstellung umweltmeteorologischer Sachverhalte

Um die Ergebnisse umweltmeteorologischer Messungen oder Berechnungen ihrer Bedeutung entsprechend möglichst objektiv einschätzen zu können, müssen diese einem Bewertungsverfahren unterworfen werden. Die Ziele einer Evaluation liegen vor allem in der Ausweisung klimatischer und/oder lufthygienischer Belastungs- bzw. Ausgleichsräume, in der Klassifizierung der Empfindlichkeit einer Fläche gegenüber bestimmten Nutzungen oder der Inwertsetzung eines klimatisch-lufthygienischen Phänomens im Hinblick auf die vorausschauende Optimierung von Flächennutzungen (MATZARAKIS 2001) (vgl. Kap. 5). Hinsichtlich der Bewertungsverfahren unterscheidet man relative von absoluten Evaluationen. Bei der relativen Bewertung werden räumliche bzw. zeitliche Unterschiede von gemessenen Größen festgestellt, ohne dass diese auf Standards bezogen werden. Eine absolute Bewertung orientiert sich hingegen an entsprechenden Prüfgrößen, die rechtsverbindlichen Charakter tragen können.

In der Human-Biometeorologie existieren verschiedene Verfahren zur Bewertung der atmosphärischen Umwelt des Menschen (KUTTLER 1999). Da es bislang nicht möglich ist, die Einflüsse des photoaktinischen, thermischen und lufthygienischen Wirkungskomplexes summarisch zu bewerten und durch einen Qualitätsanzeiger zu dokumentieren (vgl. Kap. 6), müssen jeweils Einzelbewertungen vorgenommen werden.

Zur Einschätzung des aktinischen Wirkungskomplexes wird der solare UV-Index herangezogen, der in Abhängigkeit der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke und des Hauttyps die Bestimmung des Zeitraumes der gefahrlosen Sonnenexposition erlaubt (STAIGER et al. 1997). Die Bewertung der thermischen Behaglichkeit kann über verschiedene Indizes (PMV, PET, pt) (HÖPPE 1999) erfolgen, die neben den atmosphärischen Strahlungs- und Wärmehaushaltsgrößen auch die aktivitäts- und bekleidungsabhängige Thermophysiologie des Menschen berücksichtigen (JENDRITZKY und GRÄTZ 1999, MAYER 1996).

Die insbesondere in der Lufthygiene angewandte absolute Bewertung orientiert sich hingegen an Qualitätsanzeigern, mit deren Hilfe der lufthygienische Wirkungskomplex validiert werden kann (VDI 4280, Blatt 1, HÖPPE 1996). Bewertungen von Gerüchen erfolgen mittels verschiedener, speziell auf diese Problematik abgestimmter Modelle (SCHAUBERGER et al.

2001). Eine Zusammenstellung findet sich z.B. in JACOB et al. (1999).

Eine Einschränkung der beschriebenen Verfahren liegt darin, dass damit nur die Konzentrationen einzelner atmosphärischer Spurenstoffe bewertet werden und daraus nicht im Sinne einer Summenwirkung eine Gesamtbewertung von Leitkomponenten der Luftqualität erfolgt. Erste, erfolgversprechende Arbeiten, einen derartigen Summationsindex auf der Grundlage verschiedener Luftverschmutzungsindikatoren für die Bewertung der Luftqualität aufzustellen, gehen auf BAUMÜLLER und REUTER (1995) sowie insbesondere MAYER et al. (2002) zurück.

Neben der Interpretation der Ergebnisse sollten die klimatisch-lufthygienischen Sachverhalte, sofern sie einen Flächen- bzw. Raumbezug aufweisen, in kartographischer Form dargestellt werden, um daraus Handlungsstrategien ableiten zu können (VDI 3787, Blatt 1). Dazu bieten sich sowohl „Synthetische Klimafunktionskarten“ an, in denen in generalisierter Form maßstabsgerecht raumnutzungsbezogene „Klimafunktionsräume“ dargestellt werden als auch sog. „Planungshinweiskarten“ (VDI 3787, Blatt 1, 9), die Handlungsanweisungen enthalten. Beide Kartentypen werden in der Praxis bereits vielfach zu „Planungsrelevanten Klimafunktionskarten“ zusammengefasst (BARLAG 1993) und zwecks Weiterverarbeitung in geobasierte Umweltdatenbanken eingebunden.

6 Ausblick

Die heutzutage zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden erlauben bereits eine qualitativ hochwertige und quantitativ präzise Erfassung der klimatischen und lufthygienischen Situation unserer Umwelt. Sie bedürfen jedoch noch der internationalen Vereinheitlichung. Zukünftige Forschungsaufgaben sollten sich neben einer Weiterentwicklung der Mess- und Simulationsmethodik insbesondere dem umweltmeteorologischen Bewertungsaspekt widmen. Darüber hinaus ist auf internationaler Ebene ein besonderes Augenmerk auf die bestehenden und sich durch das starke Bevölkerungswachstum verschärfenden umweltmeteorologischen Probleme insbesondere in den urban geprägten Siedlungsräumen der Entwicklungs- und Schwellenländer zu richten.

Danksagung

Die Verfasser danken Herrn Dipl.-Ing. Alexander Ropertz, FH Düsseldorf, für die konstruktive Mitarbeit am Kapitel 4.2.2.

Literatur

- BÄCHLIN, W., W. THEURER, 1995: Der Einsatz von Windkanälen bei Umweltfragen. *Staub-Reinh. Luft* **55**, 383-388.
- BARLAG, A.-B., 1993: Planungsrelevante Klimaanalyse einer Industriestadt in Tallage – dargestellt am Beispiel der Stadt Stolberg (Rheinland). Essen: *Essener Ökologische Schriften* **1**, 185 S.
- BAUMBACH, G., U. VOGT, 1999: Experimental determination of the effect of mountain-valley breeze circulation on air pollution in the vicinity of Freiburg. *Atmos. Environm.* **33**, 4019-4027.
- BAUMÜLLER, J., 1999: Zur Methodik stadtklimatologischer Messungen. Leipzig: *Wiss. Mitt. Inst. Met. Univ. Leipzig* **13**, 77-92.
- BAUMÜLLER, J., U. REUTER, 1995: Die summarische Bewertung von Luftschadstoffen durch einen Luftbelastungsindex. *Staub-Reinh. Luft* **55**, 137-141.
- BImSchG (Bundesimmissionsschutzgesetz) vom 14.05.1990, zuletzt geändert am 26.09.2002.
- BLANKENSTEIN, S., W. KUTTLER (2003): Mobile Measurements of Downward Longwave Radiation in Street Canyons (Presentation No. O.1.1). Proc. 5th Int. Conf. Urban Climate (ICUC-5), 1-5 Sept. 2003, Lodz, Poland, auf CD-ROM.
- BOLLE, H.-J., 1990: Vegetationsindizes. *Promet* **3-4/90**, 105-113.
- BRECHLING, J., 1999: Modellierung des Stadtklimas im Windkanal – Möglichkeiten und Grenzen. Leipzig: *Wiss. Mitt. Inst. Met. Univ. Leipzig* **13**, 11 – 24.
- BURROWS, J.P., M. WEBER, M. BUCHWITZ, V.V. ROZANOV, A. LADSTÄDTER-WEISSENMAYER, A. RICHTER, R. DE BEEK, R. HOOGEN, K. BRAMSTEDT, K.-U. EICHMANN, M. EISINGER, D. PERNER, 1999: The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results. *J. Atm. Sciences* **56**, 151 – 175.
- CHMIELEWSKI, F.-M., T. RÖTZER, 2002: Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Climate Research* **19**, 257-264.
- CLIFF, G.A., 1985: Use of radar in meteorology. *WMO*, WMO-technical note **181**. Genf, 90 S.
- DANZEISEN, H., 1983: Experimentelle Untersuchung bodennaher Lufttemperatur- und Feuchteverteilungen in Stadtgebieten mit Hilfe eines Meßwagens. *Beitr. Landesplf. Rheinland-Pfalz* **9**, 7-34.
- DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2002: DLR EOWEB – Satellite Data Information Service. Details siehe im Internet unter <http://eoweb.dlr.de:8080/servlets/template/welcome/entryPage.vm>.
- DOVIK, R. J., D. S. ZRNIC, 1993: Doppler radar and weather observations. 2. Aufl., San Diego, 562 S.
- DÜTTEMEYER, D., 2000: Urban-orographische Bodenwindssysteme in der städtischen Peripherie Kölns. Hohenwarsleben: *Essener Ökologische Schriften* **12**, 171 S.
- EGGERT, A. W. K., 1999: Dreidimensionale SF₆-Tracergasmessung als Methodik zum Nachweis von lokalen Luftströmungen für die Planungsorientierte Stadtklimatologie. Reihe Umweltwissenschaft. Aachen: *Shaker Verlag*, Aachen, 173 S.
- ELLEFSEN, R., 1990/91: Mapping and Measuring Buildings in the Canopy Boundary Layer in ten U.S. Cities. *Energy and Buildings* **15-16**, 1025-1049.

- EMEIS, S., 2000: Meteorologie in Stichworten, *Gebr. Borntraeger*, Berlin und Stuttgart, 199 S.
- ENGELBERT, D., H. STEINHAGEN, U. GÖRSDORF, J. LIPPMANN, J. NEISSER, 1996: A 1290 MHz profiler with rasc for monitoring wind and temperature in the boundary layer. *Contrib. Atm. Phys.* **69**, 63-80.
- FOKEN, Th., 1990: Turbulenter Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Unterlage. *Ber. Deutsch. Wetterdienst* **180**, 287 S.
- FOKEN, Th., 2003. Angewandte Meteorologie. *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg, New York, 289 S.
- GALLO, K. P., A. L. McNAB, T. R. KARL, J.F. BROWN, J. J. HOOD, J. D. TARPLEY, 1993: The use of vegetation index for assessment of the urban heat island effect. *Int. J. Remote Sensing* **14**, 2223-2230.
- GROSS, G., 1999: Numerische Modellierung stadtklimatischer Aspekte. Leipzig: *Wiss. Mitt. Inst. Met. Univ. Leipzig* **13**, 52-64.
- HEINING, K., B. WIESE, 1999: Anwendung eines elektronischen Olfaktometers zur Messung von Geruchsimmissionen. *VDI Berichte* **1443**, 617 – 626.
- HELBIG, A., J. BAUMÜLLER, M. J. KERSCHGENS (Hrsg.), 1999: Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. Aufl., *Springer-Verlag*, Berlin, 467 S.
- HOFF, R. M., K. J. MC CANN, 2002: Viewing urban and regional air quality from Space using spaceborne LIDAR. 4th Symp. Urban Environm., 20 – 24.05.02, Norfolk, VA. Boston, MA: AMS, J60-J61.
- HOLMER, B. 1992: A simple operative method for determination of sky view factors in complex urban canyons from fisheye photographs. *Meteor. Zeitschr., N.F.* **1**, 236-239.
- HÖPPE, P., 1996: Ozonwirkungen auf den Menschen. *Ann. Meteorol.* **33**, 92-99.
- HÖPPE, P., 1999: The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol.* **43**, 71-75.
- HUPFER, P., 1989: Klima im mesoräumigen Bereich. *Abh. Meteor. Dienst d. DDR* **141**, 181-192.
- JACOB, J., A. LOHMEYER, N. SCHIESS, 1999: Praxis der Berechnung und Bewertung von Gerüchen im Nahbereich niedriger Quellen in Sachsen. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **59**, 357-361.
- JAKOBI, G., P. FABIAN, 1996: Ozon und Peroxyacetylnitrat (PAN)-Konzentrationen in Innenräumen. *Ann. Meteorol.* **33**, 66-71.
- JENDRITZKY, G., A. GRÄTZ, 1999: Das Bioklima des Menschen in der Stadt. In: HELBIG, A., BAUMÜLLER, J., KERSCHGENS, M. J., (Hrsg.), 1999: Stadtklima und Luftreinhaltung, *Springer-Verlag*, Heidelberg, S. 126-158.
- KERSCHGENS, M. J. 1999: Grundlagen der Modellierung des Stadtklimas und der Schadstoffausbreitung. In: HELBIG, A., J. BAUMÜLLER, M. J. KERSCHGENS, (Hrsg.), 1999: Stadtklima und Luftreinhaltung, 2. Aufl., *Springer-Verlag* Berlin, 332-353.
- KUTTLER, W., 1996: Aspekte der Angewandten Stadtklimatologie. *Geowissenschaften* **6**, 221-228.
- KUTTLER, W., 1999: Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. *Wiss. Mitt. Inst. Met. Univ. Leipzig* **13**, 100-115.
- KUTTLER, W., A. STRASSBURGER, 1999: Air pollution measurements in urban parks. *Atmos. Environm.* **33**, 4101-4108.
- KUTTLER, W., TH. WACKER, 2001: Analyse der urbanen Luftqualität mittels mobiler Messungen. *Österr. Beitr. Meteorol. Geophys.* **27**, Publ. Nr. 399, 1-16.
- KUTTLER, W., T. LAMP, K. WEBER, 2002: Summer air quality over an artificial lake. *Atmos. Environm.* **36**, 5927-5936.
- LAMP, T. W., 2002: Immissionsklimatische Untersuchungen an einem ballungsraumnahen Freizeitsee unter Verwendung von optischen Fernmessverfahren. *Essener Ökologische Schriften* **19**, 117 S.
- LARCHER, W., 2001: Ökophysiologie der Pflanzen, 6. Aufl., *Verlag Eugen Ulmer*, Stuttgart, 408 S.
- LARSEN, S., 1998: Monitoring Networks and Air Quality Management Systems. In: FENGER, J., O. HERTEL, F. PALMGREN, (Hrsg.), 1998: Urban Air Pollution – European Aspects. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, Boston, London, 297-316.
- LORENZ, D., 1990: Fernerkundung in der Meteorologie: Grundlagen, Methoden, Anwendungen, Probleme. *Promet* 3/4 (1990), 74-77.
- LOWRY, W. P., 1977: Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *J. Appl. Meteorol.* **16**, 129 – 135.
- MANIER, G., 1998: Luftschadstoffe – messen oder rechnen? *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **58**, 221.
- MATZARAKIS, A., 2001: Die thermische Komponente des Stadtklimas. *Ber. Met. Inst. Univ. Freiburg* **6**, 266 S.
- MAYER, H., 1996: Human-biometeorologische Probleme des Stadtklimas. *Geowissenschaften* **6**, 233-239.
- MAYER, H., 2000: Umweltmeteorologie am Beginn eines neuen Jahrhunderts. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **60**, Nr. 9, 327-334.
- MAYER, H., CH. HAUSTEIN, 1994: Air Pollution caused by motor-traffic in urban spaces. *Meteor. Zeitschr., N.F.* **3**, 138-142.
- MAYER, H., F. KALBERLAH, D. AHRENS, U. REUTER, 2002: Analyse von Indizes zur Bewertung der Luft. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **62**, 177-183.
- MEASURES, R. M., 1984: Laser remote Sensing. Wiley-Interscience, New York, 510 S.
- MORISKE, H.-J., 2000: Aktive und passive Probenahmeverfahren. In: MORISKE, H.-J., E. TUROWSKI (ab 1999 fortlaufend ergänzt): Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. *Ecomed-Verlag*, Landsberg, Kap. III-6.2.1, 1-18.
- MÜCKE, H.-G., U. RANFT, TH. KOCH, 1992: Messungen kraftfahrzeuggeprägter Luftschadstoffe in der Außenluft und in Innenräumen mit Passivsammlern. *Ann. Meteorol.* **28**, 58-60.
- MÜLLER, U., G. TETZLAFF, 1999: Zur thermischen Belastung in Innenräumen. *Wiss. Mitt. Inst. Met. Univ. Leipzig* **13**, 142-148.
- OKE, T.R. 1999: Observing urban weather and climate using 'standard' stations. In: Biometeorology and Urban Climatology at the turn of the millennium. WMO/TD No. **1026**. WMO Genf 443-448.
- PARLOW, E., 1999: Remote sensed heat fluxes of urban areas. WMO/TD No. **1026**. WMO Genf: 523-528.
- PAVAGEAU, M., M. SCHATZMANN, 1999: Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon. *Atmos. Environm.* **33**, 3961-3971.

- PERSSON, P., 1997: Differential Nocturnal Cooling in the Landscape detected by Mobile Measurements. *Theor. Appl. Climat.* **56**, 215 – 224.
- PETERS, G. 1991: SODAR – ein akustisches Fernmessverfahren für die untere Atmosphäre. *Promet* **21**, 55-62.
- PLATE, E., 1996: Der Einsatz des Windkanals bei der Lösung stadtklimatischer Probleme. *Geowissenschaften* **6**, 240-244.
- PLATT, U., 1994: Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS). In: SIGRIST, M.W. (Hrsg.), *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques, Chemical Analysis*, **127**. John Wiley & Sons, New York, 27-84.
- RAPPENGLÜCK, B., K. KOURTIDIS, D. MELAS, P. FABIAN, 1999: Observations of Biogenic and Anthropogenic NMHC in the Greater Athens Area During the PAUR Campaign. *Phys. Chem. Earth (B)* **24**, 717-724.
- REITEBUCH, O., A. STRASSBURGER, S. EMEIS, W. KUTTLER, 2000: Nocturnal secondary ozone concentration maxima analysed by SODAR observations and surface measurements. *Atmos. Environm.* **34**, 4315-4329.
- REUTER, U., J. BAUMÜLLER, U. HOFFMANN, 1991: Luft und Klima als Planungsfaktor im Umweltschutz. *Expert Verlag, Ehringen*, 170 S.
- REUTER, U., U. HOFFMANN, 1998: Umweltmeteorologie. Vom Ergebnis zur Planung. *UVP-Report* **12**, 5-6.
- RÖCKLE, R., C.-J. RICHTER, K.-H. ENDERLE, 1998: Geruchsausbreitung innerhalb von Kaltluftabflüssen. Messungen und Modellrechnungen zur Erarbeitung von Planungshinweisen. *Entsorgungspraxis* **7-8**, 36-40.
- RÜHLING, A., A. LOHMEYER, 1999: Multitracertechnik zur Untersuchung überlagerter Kaltluftsysteme. *Wiss. Mitt. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig* **13**, 93-97.
- RUSSWURM, G., J. CHILDERS, 1999: FTIR Guidance Document. United States Environmental Protection Agency (EPA), Research Triangle Park. USA.
- SCHAUBERGER, G., M. PIRINGER, E. PETZ, 2001: Separation distance to avoid odour nuisance due to livestock calculated by the Austrian odour dispersion model (AODM). *Agric., Ecosyst. and Environm.* **87**, 13-28.
- 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. *Atmos. Environm.* **33**, 4185-4193.
- SCHIFF, H.I., G.I. MACKAY, J. BECHARA, 1994: The Use of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for Atmospheric Measurements. In: SIGRIST, M.W. (Hrsg.): *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques, Chemical Analysis*, **127**. John Wiley & Sons, New York, 239-333.
- SCHIRMER, H., W. KUTTLER, J. LÖBEL, K. WEBER (Hrsg.), 1993: Lufthygiene und Klima – Ein Handbuch zur Stadt- und Regionalplanung. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN. Düsseldorf: *VDI-Verlag*, 507 S.
- SCHLÜNZEN, K. H., 2002: Simulations of transport and chemical transformations in the atmospheric boundary layer – review on the past 20 year's development in science and practice. *Meteor. Zeitschr., N.F* **11**, 303-313.
- SCHNELLE, F., 1955: Pflanzen-Phänologie. Probleme der Bioklimatologie, Bd. 3. *Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig*, Leipzig, 299 S.
- STAIGER, H., U. SCHUBERT, G. VOGEL, 1997: Solarer UV-Index. *Ann. Meteorol.* **33**, 126-132.
- SÜSSENGUTH, G., 1998: Relevante Klimaelemente. Düsseldorf: *VDI Schriftenreihe*, Bd. **28** (Anthropogene Änderungen des lokalen Klimas), 17-37.
- SVANBERG, S., 1994: Differential Absorption Lidar (DIAL). In: SIGRIST, M.W. (Hrsg.), *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques, Chemical Analysis*, **127**. John Wiley & Sons, New York, 85-161.
- TETZLAFF, G., R. DAUNKE, O. FANENBRUCK, 1999: Die Validierung von Modellergebnissen für Stadtgebiete – am Beispiel der Stadt Leipzig. *Wiss. Mitt. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig* **13**, 65-70.
- VAN GYSEGEM, A., 1978: Meteorological observations in urban environment, Bruxelles: *Inst. Royal Meteorol. de Belgique*, Publ. Ser. B, No. **93**.
- VDI (Hrsg), o. J.: Ausgewählte Blätter der VDI-Richtliniensammlungen Nr. 2119, 2410, 3473, 3474, 3786, 3787, 3788, 3881, 3882, 3883, 3940, 3945, 3957, 4210, 4211, 4242, 4253, 4280 und 4285. Details siehe im Internet unter <http://www.vdi.de/vdi/vrp/richtliniensuche/index.php>.
- WEBER, S., W. KUTTLER (2003a): Cold air dynamics of railway tracks with regard to urban ventilation – a case study in consideration of the surface energy balance (Presentation O.30.1). Proc. 5th Int. Conf. Urban Climate (ICUC-5), 1-5 Sept. 2003, Lodz, Poland, auf CD-ROM.
- WEBER, S., W. KUTTLER (2003b): Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. – *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **63**, (9), 381-386.
- WEBER, K., A. ROPERTZ, T. LAMP, G. VAN HAAREN, 1999: Neuere Entwicklungen bei der FTIR-Langwegabsorptionsspektroskopie zur Messung von Luftverunreinigungen, VDI-Berichte 1443 – Neuere Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität. *VDI-Verlag*, Düsseldorf, 269-305.
- WIENERT, U., 2002: Untersuchungen zur Breiten- und Klimazonenabhängigkeit der urbanen Wärmeinsel. Hohenwarleben: *Essener Ökologische Schriften* **16**, 211 S.