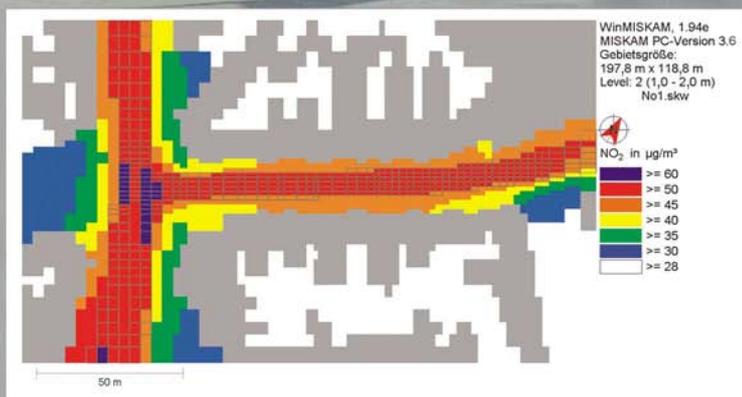
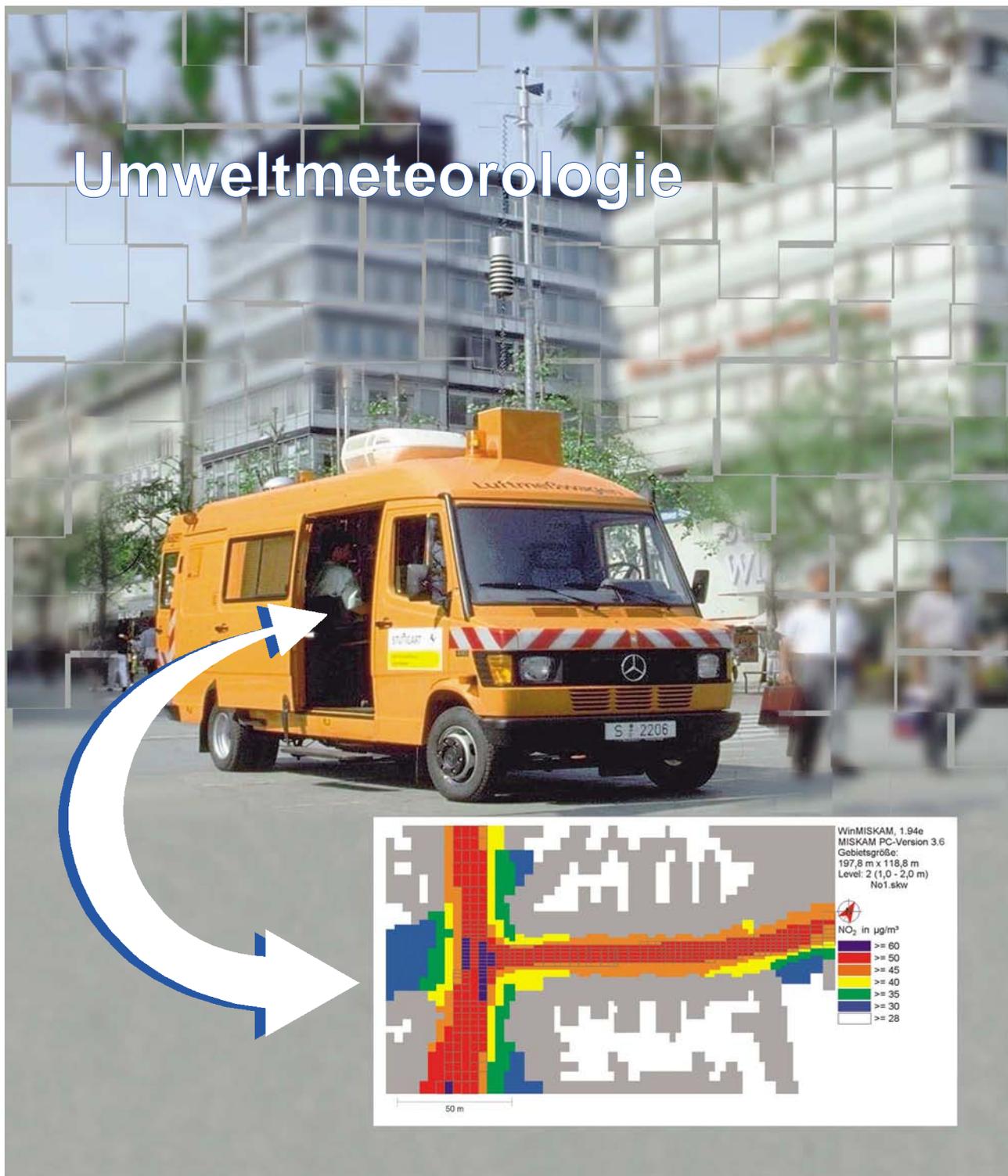




## Umweltmeteorologie



**Herausgeber**

Deutscher Wetterdienst

**Hauptschriftleiter**

Dr. H. D. Behr (Hamburg)

**Redaktionsausschuß**Dipl.-Met. **U. Gärtner** (Offenbach a. M.)

Prof. Dr. G. Adrian (Offenbach a.M.)

Prof. Dr. B. Brümmer (Hamburg)

Prof. Dr. J. Egger (München)

Prof. Dr. F. Fiedler (Karlsruhe)

Prof. Dr. G. Groß (Hannover)

Dr. J. Neisser (Lindenberg)

Prof. Dr. C.-D. Schönwiese (Frankfurt a.M.)

Prof. Dr. P. Speth (Köln)

Prof. Dr. G. Tetzlaff (Leipzig)

**Zum Titelbild:**

Die Entwicklung von Messmethoden und Rechenmodellen in der Umweltmeteorologie ist in den vergangenen Jahren weit fortgeschritten. Daher stehen heute sehr gute Verfahren zur Bearbeitung vieler umweltmeteorologischer Fragestellungen zur Verfügung. Messungen und Modelle können sich sinnvoll ergänzen, z. B. Modellrechnungen als Grundlage zur Messplanung oder Messungen zur Modellvalidierung.

Großes Bild: Umweltmeteorologische Messkampagne (Foto: Prof. Dr. Baumüller, Stuttgart).

Kleines Bild: Ergebnis einer Schadstoffberechnung in einer Straßenschlucht mit dem Modell MISKAM (Quelle: Büro Lohmeyer, Karlsruhe).

*promet* erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes – Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang (4 Hefte) im Abonnement 22,50 €, Einzelheft 6,50 €, Doppelheft 13,- €, Dreifachheft 19,50 € zuzüglich MwSt. und Versandkosten.

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

**Druck:**

Weppert GmbH & Co. KG  
97424 Schweinfurt  
Silbersteinstraße 7

ISSN 0340-4552

# Meteorologische Fortbildung

30. Jahrgang, Heft 1/2, 2003

Thema des Heftes:

**Umweltmeteorologie**

Fachliche Redaktion: Dr. U. Reuter, Stuttgart und

Prof. Dr. W. Kuttler, Essen

Fachliche Durchsicht: Prof. Dr. G. Tetzlaff, Leipzig

<b>Kapitel</b>		<b>Seite</b>
	Zu diesem Heft	1
	A. HELBIG	
<b>1</b>	Zur Geschichte der Umweltmeteorologie	2-14
	W. KUTTLER, D. DÜTEMEYER	
<b>2</b>	Umweltmeteorologische Untersuchungsmethoden	15-27
	G. GROß, C. ETLING	
<b>3</b>	Numerische Simulationsmodelle	28-38
	C.-J. RICHTER, W.-J. KOST, R. RÖCKLE	
<b>4</b>	Gerüche	39-47
	J. BAUMÜLLER, U. REUTER	
<b>5</b>	Umweltmeteorologie und Planung	48-56
	H. MAYER, A. MATZARAKIS	
<b>6</b>	Zukunftsperspektiven der Umweltmeteorologie	57-66
	Blick nach draußen	
	Der meteorologische Dienst Ungarns	67-70
	Institute stellen sich vor	
	Die Professur Meteorologie an der Technischen Universität Dresden	71-75
	P. JANLE, G. SCHULZ	
	Raum- und Zeitstruktur des Erdmagnetfeldes – ein Überblick	76-85
	J. RAPP	
	Das Satellitenbild des Monats Januar 2003 – Kondensstreifen von Handelsschiffen	86-87
	P. LEMKE	
	Einfache Energiebetrachtungen von realen und fiktiven Planeten	88-89
	Buchbesprechungen	90
	Habilitationen, Promotionen und Diplom-Hauptprüfungen im Jahr 2002	91-94
	Anschriften der Autoren dieses Heftes	94
	Redaktionelle Hinweise für Autoren	95
	Bisher erschienene Ausgaben von <i>promet</i>	96

# Thema des Heftes: Umweltmeteorologie

---

## **Zu diesem Heft**

*Die Umweltmeteorologie ist die Wissenschaftsdisziplin, die sich mit Zuständen und Prozessen beschäftigt, die durch anthropogene, physikalische und chemische Eingriffe in die atmosphärische Umwelt bedingt sind. Sie untersucht und quantifiziert ferner die daraus resultierenden Wirkungen auf Organismen, Stoffe und Materialien sowie die Möglichkeiten zur Reduzierung dieser Phänomene. Wesentliche Inhalte der Umweltmeteorologie sind die Diagnose, Prognose und Bewertung anthropogener atmosphärischer Umweltbedingungen in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenebenen. Dabei hat sie auch Strategien zur Vor- und Nachsorge zu entwickeln. Der Begriff Umweltmeteorologie stellt sprachlich eine Tautologie dar, denn die Meteorologie umfasst definitionsgemäß bereits die wissenschaftliche Beschäftigung mit der Atmosphäre und schließt die atmosphärische Umwelt ein. Dennoch wird diese Wortkombination gewählt, um die besondere Bedeutung des Fachgebietes für die atmosphärische Lebensumwelt des Menschen und damit den umweltschutzrelevanten Anwendungsbezug hervorzuheben.*

*Im Vergleich zur Allgemeinen Meteorologie, deren früheste wissenschaftliche Systematisierung auf Aristoteles zurückgeht, stellt die Umweltmeteorologie ein sehr junges Teilgebiet der Atmosphärenwissenschaft dar. Die Umweltprobleme, die ihre Ursachen hauptsächlich im verstärkten Energie- und Landschaftsverbrauch sowie in der unverminderten Zunahme des Kfz-Verkehrs haben, wurden insbesondere in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, ausgehend von den großen Ballungsräumen, evident. Um die Lebensqualität der Menschen vornehmlich in den Städten zu verbessern, erkannte man auch in der Meteorologie eine zunehmende Bedeutung für den atmosphärischen Umweltschutz. Die Kenntnisse über den Verbleib von Schadstoffen, die in die Luft gelangen sowie die Veränderung der durch den Menschen gestalteten Erdoberfläche mit ihren vielfältigen und folgenreichen Auswirkungen auf alle Klimatelemente, bilden eine wichtige Voraussetzung für effektiv gegensteuerndes Handeln.*

*Anfangs wurde auf diese Eingriffe meist nur reagiert. Schon bald zeigte sich jedoch, dass eine derartige Vorgehensweise auf Dauer nicht ausreicht, um Umweltqualität auf ausreichendem Niveau sicherzustellen. An die Stelle der Reaktion trat deshalb immer häufiger die Forderung nach einem präventiv ausgerichteten Umweltschutz, um absehbare Schäden bereits im Vorfeld vermeiden oder wenigstens minimieren zu können. Schnell wurde klar, dass dieses von der Meteorologie alleine nicht geleistet werden kann, sondern verschiedene Nachbardisziplinen bei der Problemlösung mit einzubeziehen sind. Umweltmeteorologisches Arbeiten muss deshalb von einem holistischen Anspruch ausgehen, dem nur interdisziplinäres Vorgehen gerecht werden kann.*

*Mit der reinen Ergebnisfindung ist die Bearbeitung eines umweltmeteorologischen Problems allerdings noch nicht abgeschlossen, denn die erzielten Resultate sollten keinesfalls ohne fachlich abgesicherte Bewertung präsentiert werden. Hierzu kann zum Beispiel auf die bereits etablierten Evaluierungsschemata der Human-Biometeorologie zurückgegriffen werden, da entsprechende Qualitätsstandards und zum Teil auch Grenzwerte für die verschiedenen Wirkungsfaktoren bereits bestehen. Letztlich muss auch darauf geachtet werden, dass die Ergebnispräsentation für den Anwender verständlich erfolgt und nicht nur in der Fachsprache des Spezialisten abgefasst ist.*

*Die Geburtsstunde der deutschen Umweltmeteorologie kann auf das Jahr 1975 zurückdatiert werden. Zu dieser Zeit fand sich erstmals eine Gruppe von Mitgliedern der DMG zusammen, die die Kommunikation auf dem noch jungen Gebiet des atmosphärischen Umweltschutzes – der Begriff Umweltmeteorologie wurde erst später geprägt – initiieren und verbessern wollten. In jenem Jahr wurde in Offenbach/M. der „Arbeitskreis Meteorologische Fragen des Umweltschutzes“ (AKUMET) gegründet, der 1983 in den Rang eines Fachausschusses der DMG erhoben wurde und seither den Namen „Fachausschuss Umweltmeteorologie (FA UMET)“ trägt. Meteorologen, Klimatologen, Umweltwissenschaftler, Ingenieure und Planer arbeiten hier zusammen. Der Fachausschuss veranstaltet auch wissenschaftliche Symposia zum Thema „Umweltmeteorologische Werkzeuge“ (METTOOLS).*

*Aspekte der Umweltmeteorologie wurden bereits vor mehr als 20 Jahren in „promet“ thematisiert, und zwar mit Beiträgen zum „Stadtklima“ (Vol. 9, 1979, Nr. 4) sowie zu „Klima und Planung I und II“ (Vol. 10, 1980, Nr. 3/4). Die rasante Entwicklung dieser Fachdisziplin lässt es geboten erscheinen, erneut einen Themenband der Umweltmeteorologie zu widmen, der wegen des großen fachlichen Spektrums allerdings nur einen exemplarischen Überblick erlaubt. Die nachfolgenden sechs Beiträge sind auf die heutige Praxisarbeit ausgerichtet und soweit wie möglich aufeinander abgestimmt.*

*Gleichwohl besteht für den an Einzelproblemen interessierten Leser die Möglichkeit, sich separat mit ausgewählten Beiträgen zu beschäftigen, ohne dass dabei der Blick für den Gesamtzusammenhang verloren geht. Dafür wurde eine gelegentlich auftretende Redundanz in den Einzeldarstellungen in Kauf genommen.*

U. Reuter, W. Kuttler

A. HELBIG

# 1 Zur Geschichte der Umweltmeteorologie

## 1 Definition und Aufgabenbereiche

Der Begriff Umweltmeteorologie mag zunächst als eine Tautologie erscheinen, bezieht sich doch die Meteorologie schon selbst auf die Atmosphäre bzw. auf die umgebende Lufthülle mit allen ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften und Prozessen. Den Begriff Umwelt hat der Biologe J. J. von Uexküll 1928 in die Naturwissenschaften eingeführt. Er unterscheidet zwischen der Welt einerseits und der Umwelt andererseits – verstanden als einen Ausschnitt aus der Welt, der ein Bezugsobjekt umgibt und auf dieses einwirkt. Als Umwelt definiert er also jenen Teil der objektiven Wirklichkeiten, der von einem Individuum subjektiv als „Merk- und Wirkraum“ wahrgenommen wird (GUDERIAN 2000).

Unter Umwelt im herkömmlichen, ökologischen Sinn fasst man die Gesamtheit aller Komponenten der natürlichen Außenwelt zusammen, die direkt oder indirekt auf Lebewesen einwirken und ihre Existenz ermöglichen. Die wirkenden Umweltkräfte bezeichnet man als „Umweltfaktoren“ oder „Standortfaktoren“, häufig auch als „Ökofaktoren“ oder als „ökologische Faktoren“.

Andererseits wird der Begriff Umwelt auch ausschließlich auf den Menschen bezogen verwendet, auf den an seine Bedürfnisse angepassten Lebensraum, wie er uns in Form von Agrarlandschaften, Verkehrsanlagen, gewerblichen und industriellen Einrichtungen sowie ländlichen und städtischen Siedlungen mit der dazugehörigen Infrastruktur begegnet. Zu der auf den Menschen bezogenen Umwelt zählen mithin nicht nur die abiotischen Faktoren Boden und Klima, sondern auch die Pflanzen- und Tierwelt. Nur über eine hinreichende Reinhaltung der Medien Luft, Wasser und Boden lassen sich die Funktionen der existenzsichernden Umwelt uneingeschränkt bewahren und Mensch, Tier und Pflanze dauerhaft erhalten (GUDERIAN 2000).

Die Umwelt umfasst in immer größerem Maße die vor allem für den Menschen wichtigen urbanen und industriellen Ballungsräume, wie ein Blick auf die Entwicklung der Stadtbevölkerung zeigt. Im Jahr 1950 gab es nur eine einzige Stadt mit mehr als 10 Mio. Einwohnern – New York. Dort lebten 1,7 % aller Stadtbewohner der Welt. Im Jahr 1990 waren es schon 12 Städte (mit 7,1 % der Stadtbevölkerung der Welt), und bis zum Jahr 2015 wird diese Zahl auf 27 solcher Megastädte (mit 10,9 % der Stadtbewohner der Welt) ansteigen, davon 23 in den Entwicklungsländern. In

diesen 27 Megastädten werden dann 450 Mio. Menschen leben. Davon entfallen 72 Mio. auf die Industrieländer und 378 Mio. auf die Entwicklungsländer. Tokio war 1994 der größte urbane Agglomerationsraum mit 26,5 Mio. Einwohnern, gefolgt von New York (16,3 Mio.) und Sao Paulo (16,1 Mio.). Der Anteil der Weltbevölkerung, der in Städten mit mehr als 5.000 Einwohnern lebt, nahm von 1950 bis 1995 von 29,3 % auf 45,2 % zu. Bis zum Jahr 2025 wird von der UN ein weiterer Anstieg des Anteils der Stadtbevölkerung auf 61 % der Weltbevölkerung erwartet (BIRG 1996).

In den Industrieländern ist der Prozess der Urbanisierung weitgehend zum Stillstand gekommen: Hier ging die Urbanisierung seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts in den Prozess der Suburbanisierung über: ein Begriff, mit dem das Wachstum der Peripherien der urbanen Agglomerationsräume bei gleichzeitiger Stagnation oder Schrumpfung ihrer Kernstädte bezeichnet wird. Im Unterschied dazu wachsen die Städte in den Entwicklungsländern nicht nur durch starke Zuwanderungen aus ländlichen Gebieten, sondern auch durch die Geburtenüberschüsse ihrer Stadtbevölkerungen (BIRG 1996). Eine Folge dieser Entwicklungen sind stark verdichtete Räume, die eine außerordentlich hoch belastete Umwelt (Luft- und Wasserverschmutzung, Lärmbelästigung, Verkehrsprobleme) aufweisen.

Deutschland ist im internationalen Vergleich ein sehr dicht besiedeltes Land. Die Bevölkerungsdichte lag 1996 bei 230 Einwohner/km<sup>2</sup>, wobei sich 80 % der Bevölkerung auf lediglich ein Drittel der Gesamtfläche konzentrieren. Die Siedlungs- und Verkehrsfläche erreicht im Jahr 1997 den Betrag von 4.205.169 ha (11,8 % des Territoriums) und wird nach einer Trendrechnung bis zum Jahr 2010 einen Anteil von 13,4 % an der Gesamtfläche Deutschlands erreichen. Neben den Stadtstaaten weisen das Land Nordrhein-Westfalen mit 20 % und das Saarland mit etwa 19 % besonders hohe Siedlungsflächenanteile auf (UMWELTBUNDESAMT 2001).

Mit den Wirkungen anthropogener Eingriffe in den Energie- und Stoffhaushalt und der Umgestaltung der natürlichen Erdoberfläche in bebaute und versiegelte Areale befassen sich die angewandten Zweige der Meteorologie seit langem. Die Fokussierung auf den gesamten Komplex der Sicherung der Umweltqualität und speziell der Luftqualität hat zu einem neuen Zweig der angewandten Meteorologie geführt: der Umweltmeteorologie.

Wie später noch dargestellt wird, ist allerdings der Begriff „Umweltmeteorologie“ in der Vergangenheit und auch in den verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich verstanden worden.

Eine aktuelle Beschreibung der Umweltmeteorologie hat MAYER (2000) gegeben, die sowohl die anthropogenen Eingriffe als auch das Prinzip der Vor- bzw. Nachsorge umfasst:

Die Umweltmeteorologie ist die Wissenschaftsdisziplin, die sich mit

- Zuständen und Prozessen, die durch anthropogene (d.h. von Menschen induzierte) physikalische und chemische Eingriffe in die atmosphärische Umwelt bedingt sind,
- den daraus resultierenden Auswirkungen auf Organismen (Menschen, Tiere, Pflanzen), Stoffe sowie Materialien und
- den Möglichkeiten zur Reduzierung dieser Phänomene beschäftigt.

Wesentliche Inhalte der Umweltmeteorologie sind die Diagnose, Prognose und Bewertung von anthropogen beeinflussten atmosphärischen Umweltbedingungen in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenebenen (vorwiegend mikro- und mesoskalig) sowie die Entwicklung von Strategien der Vorsorge und Nachsorge zum Abbau von Belastungen der atmosphärischen Umwelt (siehe auch Kapitel 5 und 6).

Die Umweltmeteorologie ist sowohl grundlagen- als auch anwendungsbezogen. Sie hat einen stark ausgeprägten interdisziplinären Charakter und umfasst zunächst die Meteorologie und Klimatologie und darin speziell die Physik der atmosphärischen Grenzschicht, die Luftchemie, die numerische Modellierung, Stadtklimatologie, Geländeklimatologie, Human-Biometeorologie und Luftreinhaltung. Damit verbunden sind Stadt- und Regionalplanung, Energiewirtschaft (erneuerbare Energien), Bauwesen, Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Bodenkunde, Materialwissenschaft, Informatik, Umweltrecht, Umweltmedizin, Umweltökonomie, Umweltsoziologie sowie Umweltmanagement. Die Umweltmeteorologie stellt damit einen Bereich der angewandten Meteorologie dar, in dem die Schnittmengen sehr unterschiedlicher Wissensgebiete bearbeitet werden.

Zu den typischen Arbeitsweisen und Methoden in der Umweltmeteorologie gehören:

- Analyse, Modellierung und Bewertung der thermischen, lufthygienischen und aktinischen Wirkungskomplexe in bebauten Gebieten und im Umland,
- Berechnung der Ausbreitung von Luftbeimengungen unter verschiedenen atmosphärischen und technischen Bedingungen,

- Analyse und Modellierung des Windfeldes und der Windwirkungen,
- Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen den atmosphärischen Bedingungen im Freien und in geschlossenen Räumen,
- Quantifizierung der Schadstoffeinträge (trocken, nass, feucht) in Organismen, Stoffe, Materialien, Böden und Gewässer sowie
- Abschätzung des Potentials erneuerbarer Energien (Wind- und Solarenergie) und
- Bewetterungsversuche durch Auslagerung technischer Erzeugnisse (MAYER 2000, KOST und WILHELM 1992).

Sehr viel einschränkender trifft nach EMEIS (2000) „die Umweltmeteorologie (auch technische Meteorologie genannt)“ ... „Aussagen zur Luftreinhaltung und zur Energieerzeugung (Windenergie und Wasserkraft).“

FOKEN (2003) schreibt, dass die Mikrometeorologie die theoretischen, experimentellen und klimatologischen Grundlagen für jene Bereiche der angewandten Meteorologie liefert, die im Bereich der atmosphärischen Boden- und Grenzschicht angesiedelt sind. Moderne Wortprägungen, z. B. Umweltmeteorologie, ließen sich im Wesentlichen auch diesem Bereich zuordnen. Zur angewandten Meteorologie wird demnach auch das Gebiet „Ausbreitung von Luftbeimengungen“ gerechnet, das umfassende Bezüge zur Mikrometeorologie hat.

Wenngleich die Klimatologie als ein Teilgebiet der Meteorologie verstanden wird, das sich durch eine andere Zeitskala von ihr unterscheidet, so erscheinen einige Anwendungsgebiete mit gleichem Inhalt sowohl in Verbindung mit dem Wort Klimatologie als auch mit dem Wort Meteorologie, z. B. Biometeorologie/Bioklimatologie, Technische Meteorologie/Technische Klimatologie. Zu den Definitionen dieser Gebiete äußert sich u. a. WANNER (1986).

## 2 Historische Wurzeln

Der Weg zur Umweltmeteorologie führt über die Entwicklung der verschiedenen Zweige der angewandten Meteorologie. Die historische Entwicklung der Meteorologie weist in ihren Anfängen im 17. Jahrhundert eine enge Bindung zu den Fortschritten in der Physik und der Chemie auf. Gleichzeitig können die theoretischen Erkenntnisse mit den sich parallel rasch entwickelnden Beobachtungsinstrumenten verifiziert werden. Diese beiden Tatsachen schaffen die Grundlage zur Einrichtung von meteorologischen Beobachtungsnetzen, die erstmals mit Instrumenten annähernd gleicher Bauweise und Genauigkeit sowie mit einheitlicher Beobachtungsmethodik nach mittlerer Ortszeit gleichzeitige Messungen der atmosphärischen Zustandsgrößen erlauben. Beispielsweise wurde nach der Gründung des Preußischen Meteorologischen Instituts

in Berlin im Jahr 1848 ein Messnetz in Preußen aufgebaut, das aus etwa 35 Klimastationen bestand, die alle mit einheitlichen Beobachtungsinstrumenten ausgestattet waren und nach einer einheitlichen Methodik die Beobachtungen und Messungen durchführten. Die Daten aus solchen Messnetzen bildeten eine für die damalige Zeit erstmals verlässliche Grundlage sowohl für die Landwirtschaft, aber auch für andere Wirtschaftszweige wie die Forst- und Bauwirtschaft. Diese Entwicklung führt zu den Anfängen einer Agrar- und einer Forstmeteorologie.

Mit der Entwicklung der Luftfahrt, beginnend mit Ballonfahrten und am Anfang des 20. Jahrhunderts mit den rasch an Leistungsvermögen gewinnenden Flugzeugen, verbindet sich ein zweifacher Effekt für die Meteorologie. Zum einen wird der Transport von Messgeräten in die freie Atmosphäre und damit die Erfassung von meteorologischen Daten *in situ* möglich, zumindest im Bereich der gesamten Troposphäre, und zum anderen die Anwendung meteorologischer Erkenntnisse auf die Entwicklung, Konstruktion und den Betrieb von Luftfahrzeugen. Die Fortschritte im Flugwesen wirken sich außerordentlich stimulierend auf Gewinnung meteorologischer Kenntnisse in der Synoptik und in der atmosphärischen Grenzschicht aus. Mit wachsenden Datenumfängen über atmosphärischen Zustandsgrößen und Prozesse, verbunden mit der Einrichtung synoptischer (gleichzeitig beobachtender) Wetterstationen, werden weitere Anwendungsbereiche meteorologischer und klimatologischer Daten erschlossen. Die Weiterentwicklung der meteorologischen Messtechnik (insbesondere Strahlungsmessungen im kurz- und langwelligen Spektralbereich) sowie die Zunahme der verfügbaren Daten ermöglicht die Entwicklung der Biometeorologie bzw. der Humanbiometeorologie. R. Geiger fasst erstmals 1929 viele Untersuchungsbefunde aus den Zweigen der angewandten Meteorologie in seiner Monographie „Das Klima der bodennahen Luftschicht“ zusammen, die zu einem Standardwerk werden sollte (GEIGER 1929).



Abb. 1-1:  
Schornsteine in einer englischen Industrielandschaft im 19. Jahrhundert.

Die rasche zunehmende Zahl der Arbeiten zum Stadtklima reflektiert die Tatsache, dass immer mehr Menschen in Städten und industriellen Ballungsräumen leben. Diese Gebiete belegen andererseits die zunehmende Einwirkung des Menschen auf seine natürliche Umwelt. Abgesehen von den Berichten über die Anzeichen einer urbanen Luftverschmutzung im mittelalterlichen London markiert die industrielle Revolution in

der Mitte des 19. Jahrhunderts den Beginn relevanter anthropogener Einwirkungen auf die natürliche Umwelt. Die schnell zunehmende Verwendung der Dampfmaschine, deren kohlebeheizte Dampfkessel die Luftverunreinigung durch Ruß und Rauchgase, den „city fog“ erzeugen, führt in London zu einer wahrnehmbaren Veränderung der urbanen Atmosphäre (Abb. 1-1).

Die Beschreibung der positiven Lufttemperaturanomalie im Stadtzentrum Londons durch Howard 1833 kennzeichnet das markante Phänomen eines besonderen „Stadtklimas“ (LANDSBERG 1981). Damit entsteht ein Arbeitsgebiet, in dem sich die Biometeorologie zunächst dem Wärmeinselphänomen und später dem aktinischen und schließlich dem luftchemischen Wirkungskomplex zuwendet. Renou bearbeitet 1855 die Aufzeichnungen von Paris und stellt dort ebenfalls den Lufttemperaturunterschied zwischen Stadt und Umland fest. Nach mehr als 20 Jahren erfolgen dann 1886 die Untersuchungen Kremers über die Temperaturunterschiede in Berlin (KRATZER 1937).

Dorno in der Schweiz und Landsberg in den USA beginnen mit Untersuchungen zur Wirkung des Klimas auf den Menschen. Im Bauwesen werden die klimatologischen Daten für die Elemente Niederschlag, Lufttemperatur, Windfeld und Globalstrahlung hinsichtlich bauphysikalischer Fragestellungen (Durchfeuchtung von Gebäudewänden infolge Schlagregen, Entwärmung der Gebäude durch Windexposition, Festlegung des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes, Windlast) zu wichtigen Arbeitsunterlagen für die Architektur und den Bauentwurf (GRIFFITH 1966, SMITH 1974).

In den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt sich – zunächst in den USA – im Grenzbereich zwischen technischen Wissenschaften und der Meteorologie ein weiterer Zweig der angewandten Meteorologie, der als „Industrial Meteorology“ bezeichnet wird.

International wird unter „Industriemeteorologie“ die Anwendung meteorologischer Kenntnisse, Meßmethoden und Praxis auf industriell-technologische Prozesse verstanden (AMS 2000).

### 3 Internationale Entwicklung bis zur Gegenwart

Nach dem 2. Weltkrieg wächst die Sensibilität gegenüber den komplexen Beziehungen zwischen der Atmosphäre und den sozialen, ökologischen sowie ökonomischen Rahmenbedingungen der modernen Welt.

Die Zweige der angewandten Meteorologie entwickeln sich außerordentlich stark, und so finden sich neben den bisherigen traditionellen Gebieten weitere Anwendungen in anderen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft (SMITH 1974).

Nach CROW (1988) erlebt die angewandte Klimatologie eine Evolution von einer mehr statistischen Funktion zu einem ökonomischen Faktor. Die „Industrial Meteorology“ trägt zur Optimierung der nutzerorientierten Wettervorhersagen (Vorhersagen/Sturmwarnungen für die Bauindustrie, Niederschlagswarnungen), zur Nutzung von meteorologischen Informationen in den Energieversorgungsunternehmen für Gas, Fernwärme und Elektroenergie sowie zur Minimierung von Umweltschäden bei. Zu den typischen Aufgaben zählen die Berechnung der Ausbreitung von Luftverunreinigungen und die Definition staatlicher Regularien zum Umweltschutz. Der Anteil an einer meteorologischen Unternehmensberatung wächst. Gegenwärtig sind etwa 10 % der rund 8.000 Meteorologen der USA im Bereich der Industriemeteorologie tätig. Aber auch staatliche Institutionen wie die NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) beschäftigen spezielle Berater für Gewerbe und Industrie ebenso wie der National Weather Service. Auch Umwelttechnikfirmen spezialisieren sich auf die Bedürfnisse der Unternehmen bei der Sicherung der Luftqualität und der Erfüllung von Auflagen des Umweltschutzes (BENNER 1958, BRUNT 1950, KOCH 1969, PARKER 1980).

Zu den Aufgaben einer „Engineering Meteorology“ gehört die Untersuchung der Wechselwirkungen von Oberflächen mit Schadstoffen, um die Verwitterung (Korrosion und Degradation) von Materialien abschätzen zu können (MUNN 1959). Schließlich entsteht in den USA eine „Technoclimatology“, die sich mit der Verbindung zwischen Klima und Gesundheit, Wohnen, Bekleidung sowie Wasserversorgung beschäftigt (MATHER 1974).

Neben den Zweigen „Industrial Meteorology“ und „Engineering Meteorology“ entwickelt sich in den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts eine „Topoclimatology“, deren Arbeitsfeld THORNTHWAITE (1954) als eine Ergänzung zu den Richtungen Mikrometeorologie und Mikroklimatologie definiert. Er fokussiert die Aufmerksamkeit auf die Eigenschaften der Landoberflächen, die den Austausch von Wärme, Feuchte und Impuls in der unteren Atmosphäre beeinflussen. Die Befunde der Topoklimatologie sind von direkter Relevanz für Land- und Forstwirtschaft, Wasserbau und Ingenieurwesen, die alle von den lokalen klimatischen Bedingungen abhängen und ihrerseits durch die Tätigkeit des Menschen eine Veränderung erfahren. Vor allem in den urbanen Ballungsräumen geht es um die Hauptquellen der Luftverunreinigungen, die z. B. im Fall des CO<sub>2</sub> weit über den mikro- und mesoskaligen Effekt hinaus zu globalen Veränderungen führen können (WELLBURN 1997).

Als in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts die Probleme einer anthropogenen Beeinflussung meteorologischer Prozesse immer mehr in den Vordergrund treten, gewinnt die Klimatologie wegen ihrer Umwelt-

relevanz außerordentlich an Bedeutung und vereint in der Klimaforschung einen weiten Kreis von Wissenschaftsdisziplinen. Die Forschungen zum Stadtklima und zur Steuerung der Lebensqualität in Städten erhalten neue Impulse (CHANDLER 1976; LANDSBERG 1981). In einem Statement der WMO heißt es im Jahr 1997, dass die urbane Umwelt zunehmend als der kritische Brennpunkt in den Maßnahmen bezüglich einer nachhaltigen Entwicklung und der Klimaänderung gesehen werden muss (WMO 1997) (Abb. 1-2).



Abb. 1-2: Stadtlandschaft: Lebensraum für einen wachsenden Teil der Weltbevölkerung.

In zunehmendem Maße wird neben experimentellen Arbeiten versucht, mit numerischen Modellen die Struktur der atmosphärischen Grenzschicht über der Stadt zu erfassen, insbesondere zur Vorhersage der Ausbreitungsbedingungen für Schadstoffe in der urbanen Atmosphäre. Solche numerischen Modelle nehmen in den Literaturberichten z. B. von JAUREGUI (1996) einen breiten Raum ein.

Der lufthygienische Wirkungskomplex in der Humanbiometeorologie gewinnt hinsichtlich der Beziehungen zwischen Klima, Luftbelastung und Gesundheit des Menschen an Bedeutung. Zahlreiche Standards zur Lufthygiene liefern Orientierungen für die Planung und Sicherung einer ausreichenden Luftqualität vor allem in den urbanen Gebieten. Die Untersuchungen zu den Behaglichkeitsbedingungen (Diskomfortgleichung nach Fanger) bilden andererseits die Grundlage von Bewertungsmaßstäben und Berechnungsverfahren, die in staatlichen Richtlinien ihren Niederschlag finden.

Auf experimentellem Gebiet liefern breit angelegte Messprogramme in Städten umfangreiches Beobachtungsmaterial. Das Projekt „METROMEX“ (Metropolitan Meteorological Experiment) in den USA hat z. B. die Wirkung urbaner Aerosole auf wolkenphysikalische Prozesse und die Analyse des Einflusses der Stadt auf die Niederschlagsbildung zum Inhalt (LOWRY 1974).

In jener Zeit tauchen in der wissenschaftlichen Diskussion viele Kombinationen zwischen der Bezeich-

	1968 in Brüssel	Conference on Urban and Building Climatology, World Meteorological Organization (WMO) in cooperation with the World Health Organization (WHO)
	26.-30.11. 1984 in Mexico D.F.	Technical Conference on Urban Climatology and its Applications with Special Regard to Tropical Areas, WMO and Co-Sponsored by WHO
ICUC - 1	1989 in Kyoto	Conference on Urban Climate, Planning and Building
ICUC - 2	28.3.-2.4.1993 in Dhaka/Bangladesh	Technical Conference on Tropical Urban Climates, WMO Tropical Urban Climate Experiment (TRUCE)
ICUC - 3	10.-14.6.1996 in Essen	International Conference on Urban Climatology (ICUC '96)
ICUC - 4	8. - 12.11.1999 in Sydney/Australien	15. International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology (ICB-ICUC '99)
ICUC - 5	1.-5. 9. 2003 in Łodz/Polen	Fifth International Conference on Urban Climate

Tab. 1-1: Internationale Konferenzen zum Stadtklima und zur Biometeorologie ICUC und Vorgänger.

nung einer Wissenschaftsdisziplin und dem Begriff „Umwelt“ auf wie: Umweltgeophysik, Umweltphysik, Umweltchemie, Umweltmedizin, Umweltpolitik, Umweltökonomik und als Handlungsfelder Umweltschutz und Umweltforschung (FABIAN 1992, MONTEITH und UNSWORTH 1973).

Das Erscheinen des Begriffs „Umweltmeteorologie“ lässt sich zeitlich ebenfalls diesem Zeitraum zuordnen, ohne dass eine klare Definition zu finden wäre. FLEMMING (1979) schreibt zum „neuerdings gebrauchten“ Begriff „Umweltmeteorologie“, dass dieses Gebiet gleichsam einen Querschnitt durch die anderen Teilgebiete der angewandten Meteorologie zum Inhalt habe, wobei allerdings letztlich der Mensch den Zielpunkt der Betrachtung darstellt.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit bildet ein wesentliches Kennzeichen bei allen Aufgaben der Umweltgestaltung und des Umweltschutzes. Bevorzugte Arbeitsgebiete werden nun Fragen der Luftqualität in dicht besiedelten Gebieten, speziell auch die Berechnung der Ausbreitung von Luftschadstoffen in der durch das Stadtgebiet modifizierten atmosphärischen Grenzschicht.

In der Publikationsreihe „Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie“ läuft die Serie B seit ihrer Gründung im Jahr 1948 bis zum Jahrgang 1968 unter dem Titel „Allgemeine und biologische Klimatologie“, ab Jahrgang 1969 unter „Klimatologie, Bioklimatologie und Strahlungsforschung“ und seit 1971 bemerkenswerterweise unter dem Titel „Klimatologie, Umweltmeteorologie und Strahlungsforschung“.

In der Fachliteratur erscheint ein Sammelband „Environmental Meteorology“ mit Vorträgen von dem ersten internationalen Symposium „Environmental Meteorology“ in Würzburg 1987 (GREFEN und LÖBEL 1988). Ihm folgen weitere Veröffentlichungen mit der Bezeichnung „Umweltmeteorologie“ (z. B. AHRENS und MAYER 1988).

Zur Förderung der Verbindung zwischen Meteorologie und Bauwesen veranstalten die World Meteorological Organisation (WMO) und der CIB (International Council for Building) im Oktober 1968 in Brüssel erstmals ein gemeinsames Kolloquium über Stadt- und Gebäudeklimatologie (WMO 1970).

In dieser Zeit entsteht auch die Monographie „Boundary Layer Climates“ von OKE (1978), die eine umfassende Übersicht über die Besonderheiten der atmosphärischen Grenzschicht in Abhängigkeit von den verschiedenen Unterlagen (Freiland, Vegetation, bebaute Areale) bereitstellt. Ausführliche Bibliographien zum Stadtklima erscheinen, die den internationalen Austausch auf diesem Gebiet fördern (z. B. JAUREGUI 1996).

Die regelmäßig veranstalteten Konferenzen zur Bioklimatologie und zum Stadtklima stellen ein internationales Forum der Umweltmeteorologie dar, von denen die letzte Konferenz ICUC-5 im September 2003 in Łodz stattfand (Tab. 1-1).

Auch auf den regelmäßig veranstalteten Konferenzen der American Meteorological Society stehen Fragen der Umweltmeteorologie im Vordergrund (z. B. AMS 1999). Es ist terminologisch bemerkenswert, dass sowohl in den USA als auch in vielen anderen Ländern unter dem Begriff „Umweltmeteorologie“ zwar überwiegend Fragen der Luftverunreinigung und der Luftqualität in urbanen Arealen verstanden werden, aber vereinzelt auch alle globalen Fragen der Meteorologie im Zusammenhang mit dem „Globalen Wandel“.

## 4 Umweltmeteorologie in Deutschland

### 4.1 Zeitraum: 1945 – 1989

In Deutschland lassen sich nach dem zweiten Weltkrieg in den beiden sich herausbildenden Staaten BRD und DDR unterschiedliche Entwicklungswege in Institu-

tionen und Strukturen im Umweltschutz und in der Umweltmeteorologie nachzeichnen, deren Zielrichtungen sich ähneln, jedoch von den jeweiligen gesellschaftspolitischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Verhältnissen geprägt sind.

#### 4.1.1 Bundesrepublik Deutschland

Vor allem seitens des Bauwesens steigt beim Wiederaufbau der Städte nach dem Krieg der Bedarf an meteorologischen und klimatologischen Informationen. KNOCH (1952) führt 1946 die Bezeichnung „Technische Klimatologie“ ein und löst damit eine Diskussion um die Bezeichnung eines Fachgebietes aus, das später hauptsächlich im Deutschen Wetterdienst in voller Breite unter dem Namen „Technoklimatologie“ betrieben wird (CASPAR 1973).

Der maßgebliche Vertreter der Technischen Klimatologie/Technoklimatologie war Reidat in Hamburg (z. B. REIDAT 1963). Von den vielen Anwendungsbereichen der Technoklimatologie steht besonders die Stadt- und Gebäudeklimatologie im Vordergrund.

Mit dem Wiederaufbau in Deutschland wächst der Energieverbrauch, die Industrialisierung nimmt zu, die Landnutzung unterliegt raschen Veränderungen, die Anzahl der zugelassenen Kraftfahrzeuge erhöht sich rapide, und damit verbunden wachsen die Emissionen aus den unterschiedlichsten Quellen. Das führt zu einer starken Zunahme der Umweltbelastungen mit den klassischen Immissionskomponenten und einer rasch ansteigenden Palette der verschiedensten chemischen Verbindungen aus der chemischen Industrie sowie aus den Kraftfahrzeugabgasen. Diese Entwicklung wird von vielfältigen Bemühungen auf verschiedenen Ebenen begleitet, durch Gesetze und Richtlinien diese Emissionen und Immissionen zu reduzieren. Dabei konzentrieren sich die Maßnahmen im praktischen Immissionsschutz auf die auffälligen Phänomene: die hohe Belastung mit SO<sub>2</sub>, die Staubbiederschläge und die Feinststäube (GUDERIAN 2000).

So steigen im alten Bundesgebiet, gekoppelt an den wachsenden Energieverbrauch, die SO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 1972 auf etwa 4.000 kt/a an. Vor allem durch die Entschwefelung der Kraftwerksemissionen ab Mitte der 80er Jahre erfolgt seitdem eine stetige Abnahme. Im Jahr 1994 liegt die SO<sub>2</sub>-Emission nur noch bei 874 kt/a (BAUMÜLLER 1999, UMWELTBUNDESAMT 2001).

In der Forschung befasst man sich schon in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts intensiv mit Fragen der Erfassung und Bewertung von Immissionsbelastungen und ihren Wirkungen. Binnen relativ kurzer Zeit werden wesentliche Fortschritte in der Messtechnik erzielt, d. h. in der Bestimmung von einzelnen Verunreinigungs-komponenten in den Medien

Luft, Wasser und Boden sowie in den Proben von Lebewesen. Damit verbessern sich sehr schnell die Voraussetzungen für die Durchführung von großräumigen Immissionsmessprogrammen zur Luftqualitätsüberwachung in den einzelnen Bundesländern. Auch die Wirkungsforschung profitiert von der Fortentwicklung der Dosier- und Messtechnik.

In der BRD ist die Lösung von Problemen der Umweltmeteorologie und des Umweltschutzes Aufgabe sowohl der staatlichen Einrichtungen des Bundes und der einzelnen Bundesländer (Umwelbundesamt Berlin, vorher Gesundheitsamt; Landesämter für Umweltschutz), des Deutschen Wetterdienstes, der Universitäten und Hochschulen als auch privater Überwachungs- und Beratungsunternehmen (Technische Überwachungsvereine, Ingenieurbüros, Umweltberater).

Auf eine eingehende Darstellung der Aufgabenbereiche der einzelnen Institutionen und Projekte wird hier verzichtet, weil darüber bereits in früheren Ausgaben von *promet* berichtet wurde. Beispielhaft soll hier nur das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sowie vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) (seit 1994 Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF) geförderte Forschungsvorhaben „Mesoskalige Modelle“ (DFG 1988) erwähnt werden, dessen Resultate (z. B. REWIMET, FITNAH/RKM, KAMM) wesentlich zur numerischen Behandlung von Problemen der Umweltmeteorologie beigetragen haben. Daneben erfolgt die Entwicklung spezieller Stadtklimamodelle wie UBIKLIM und MUKLIMO. Einen ausführlichen Überblick über den Entwicklungsstand mesoskaliger Modelle gibt SCHLÜNZEN (1994). Im Kapitel 3 findet man Näheres über numerische Simulationsmodelle.

Auch groß angelegte Experimente zur Erfassung der meteorologischen, lufthygienischen und biometeorologischen Verhältnisse in Städten, wie das Projekt „STADTKLIMA BAYERN“ werden gestartet. Dieses Projekt mit der vollständigen Bezeichnung „Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten“ lief von Dezember 1980 bis 1984 am Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München (MAYER 1987). Dieses Projekt wie auch das Projekt „STUTTGART 21“ (BAUMÜLLER 2000) tragen wesentlich zum Erkenntnisgewinn in der Umweltmeteorologie bei.

Die wissenschaftliche Diskussion auf dem Gebiet der Umweltmeteorologie wird auf den Tagungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG e.V.) mit unterschiedlichen Zielrichtungen geführt (Tab. 1-2), wobei die Beiträge zunehmend nicht nur aus dem Bereich der Meteorologie kommen.

Fragen der Luftreinhaltung werden zunächst auf der Grundlage der „Technischen Anleitung zur Reinhaltung

„tung der Luft“ aus dem Jahr 1964 bearbeitet. Das im Jahr 1974 erlassene Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) bildet seither nicht nur das wohl bedeutendste Fachgesetz auf dem Gebiet des Umweltschutzes, sondern auch einen zentralen Baustein des Wirtschaftsverwaltungsrechts. Es wird durch eine doppelte Zielsetzung geprägt: auf der einen Seite sucht es die durch Immissionen bedingten Probleme zu bewältigen. Auf der anderen Seite geht es um den Schutz vor Immissionen und damit um den Schutz vor Luftverunreinigungen, vor Lärm, vor Erschütterungen, vor Licht, vor Wärme, vor (nicht ionisierenden) Strahlen und vor ähnlichen Erscheinungen. Insoweit ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz, seinem Sinn entsprechend, Immissionsschutzrecht und damit Umweltrecht (JARASS 1997). Die Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – vom 27. Februar 1986 regelt auf der Basis des § 48 BImSchG seither die mit der Emission, Transmission und Immission von luftfremden Stoffen verknüpften Fragen des

Umweltschutzes, der Umweltqualität und der Umweltüberwachung (TA LUFT 1986). Die Umsetzung der TA Luft ist eng mit den Arbeiten von G. Manier an der TU Darmstadt verbunden. Im Abschnitt 5.2 wird auf die weitere Entwicklung der TA Luft eingegangen.

Zum Zweck des interdisziplinären wissenschaftlichen Austausches auf dem Gebiet des Umweltschutzes etablierte sich 1975 in Offenbach ein „Arbeitskreis Umweltschutz und Meteorologie“ (AKUMET) in der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG e.V.), der inzwischen als Fachausschuss UMET ein Begriff ist. Der Fachausschuss „Umweltmeteorologie“ (FA UMET) der DMG e.V. wurde 1983 durch Umwandlung der bisherigen Arbeitsgruppe AKUMET eingerichtet und nimmt seither die Bearbeitung aller meteorologischen Fragen des Umweltschutzes innerhalb der DMG e.V. wahr. In der Reihe der Vorsitzenden des AKUMET bzw. des FA UMET spiegeln sich die an der Realisierung des Umweltschutzes beteiligten Institutionen wider (Tab. 1-3).

27. - 30.4.1966	Meteorologen-Tagung in München Mikrometeorologie / Biometeorologie / Bioklimatologie Ann. Meteor. NF 3 (1967)
1. – 6.4.1968	Meteorologen - Geophysiker -Tagung in Hamburg Luftchemie / Immissionsmessung / Ausbreitung Ann. Meteor. NF 4 (1969)
27. - 29.3.1974	Meteorologen-Tagung in Bad Homburg v.d.H. Anthropogene Klima- und Wetterbeeinflussung Ann. Meteor. NF 9(1974)
13. - 16.4.1977	Meteorologen-Tagung in Garmisch-Partenkirchen Hydrometeorologie / Stadt- und Landschaftsklima (Umweltschutzaspekte) Ann. Meteor. NF 12 (1977)
25. - 29.2.1980	Deutsche Meteorologen-Tagung in Berlin in Verbindung mit dem Internationalen Alfred-Wegener-Symposium 1980 Ann. Meteor. NF 25 (1980)
14. - 17.4.1986	Deutsche Meteorologen-Tagung in Münster Das globale Klima und unsere Umwelt / Modelle / Meteorologische Fragen des Umweltschutzes Ann. Meteor. NF 23 (1986)
16. - 19. 5 1989	Deutsche Meteorologen-Tagung 1989 in Kiel Atmosphäre, Ozeane, Kontinente / Mesoskalige Prozesse Ann. Meteor. NF 26(1989)
16. - 20.3.1992	Deutsche Meteorologen-Tagung 1992 in Berlin Wechselwirkung Atmosphäre - Biosphäre / Mesoskalige Prozesse Ann. Meteor. NF 27 (1992)
11.- 15.9.1995	Meteorologen-Tagung 1995 in München Atmosphärische Umweltdiagnose und -vorhersage / Angewandte Meteorologie / Windkanal / Bioklima Ann. Meteor. NF 31 (1995) 199 S.
16. - 17.10.1997	Vorhersage: Wetter, Klima, Umwelt. Symposium zur Einhundertfünfzigjahrfeier des Preußischen Meteorologischen Instituts Berlin. Ann. Meteor. NF 36(1998) 231. S.
14. - 18.9.1998	Deutsche Meteorologen-Tagung in Leipzig Biometeorologische Aspekte von Klimaänderungen / Urbane Meteorologie und lokale Effekte Ann. Meteor. NF 37 (1998) Band 1 und 2
18. - 21.9.2001	Deutsch - Österreichisch - Schweizerische Meteorologen - Tagung in Wien Agrar-, Forst-, Medizinmeteorologie / Umweltphysik / Chem. Prozesse / Gerüche und deren Ausbreitung / Umweltmeteorologie incl. Verfahren / Planung / Qualitätssicherung Österr. Beitr. zu Meteorol. u. Geophysik, Heft 27/Publ. Nr. 399 (2001), 378 S.

Tab.1-2: Tagungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. mit Bezug zur Umweltmeteorologie.

#### 4.1.2 Deutsche Demokratische Republik

Ähnlich wie in der BRD steigt auch hier der Bedarf an meteorologischen Informationen mit dem Wiederaufbau der Wirtschaft rasch an. In der Diskussion um die Berücksichtigung technischer Belange in der meteorologischen Beratung macht GRUNDKE (1955) den Vorschlag einer Aufteilung der „Technischen Klimatologie“ (s. o. Technische Klimatologie nach K. Knoch) in zwei Arbeitsgebiete: die „Industrielle Klimatologie“ und die „Ingenieur-Klimatologie“. Zu den Arbeitsgebieten der „Technischen Klimatologie“ zählen die Standortwahl für Industrieanlagen auch hinsichtlich der lokalen Ausbreitungsbedingungen für Rauch und Abgase.

Die „Ingenieur-Klimatologie“ unterstützt, basierend auf den Daten der Wetterdienste, die Ingenieure beim Entwurf von Windkraftanlagen, bei der Projektierung von „Sonnenmotoren“, beim Entwurf von Freileitungen und der Quantifizierung meteorologischen Lastannahmen. Die „Industrielle Klimatologie“ kommt

ohne neuartige Ansätze und Untersuchungsmethoden nicht aus. Von besonderer Wichtigkeit sei die Untersuchung der Luftverunreinigung und der Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre sowie der Konsequenzen für die lufthygienischen Verhältnisse in der Umgebung solcher Anlagen.

Für die Entwicklung der angewandten Meteorologie war die Monographie „Technische Meteorologie“ von BÖER (1964) von Bedeutung, weil er dort den Begriff „Technische Meteorologie“ wie folgt definierte: „Unter einer Technischen Meteorologie ist...vor allem die Anwendung meteorologischer Unterlagen und Kenntnisse auf alle Zweige der Technik zu verstehen.“ Er setzte sich mit dieser Definition bewusst von anderen Bezeichnungen ab, die in der BRD und in anderen Ländern üblich waren, wie Technische Klimatologie, Technoklimatologie oder Technoklima (s. o.).

Die Meteorologische Gesellschaft in der DDR veranstaltet im Jahr 1966 in Dresden einen viel beachteten Kongress „Technische Meteorologie“ (siehe auch Tab. 1-4), wo die Entwicklung dieser Arbeitsrichtung hauptsächlich in den beiden deutschen Staaten ausführlich zur Debatte steht. Das Themenspektrum der Vorträge umfasst Bereiche, die man heute der Umweltmeteorologie zurechnen würde.

Eine Nebenentwicklung ergibt sich an der Universität Leipzig, wo H. KOCH 1966 eine Gruppe „Industriemeteorologie“ am Geophysikalischen Institut in Anlehnung an die amerikanische Arbeitsrichtung und in klarer Abgrenzung zu den Aufgabenbereichen einer Technischen Meteorologie aufbaut, so wie sie W. Böer verstand. Die Diskussion um diese Arbeitsrichtung und Bezeichnung verläuft zeitweise sehr lebhaft. Über die Arbeiten dieser Gruppe, die mit Projekten in verschiedenen Industriezweigen verbunden waren, gibt ein Sammelband Auskunft (KOCH 1969).

Im Zuge der 3. Hochschulreform in der DDR 1968/1969 wird das Geophysikalische Institut der Universität Leipzig aufgelöst und damit auch die Gruppe „Industriemeteorologie“, von der einige Mitarbeiter in der Industrie eine Forschungs- und Beratungsstelle aufbauen, die sich nun vorwiegend mit Fragen der Belüftung und Klimatisierung von Produktionsräumen befasst.

Grundsätzlich obliegt die gesamte Datenerfassung, Beratung und Gutachtenerstellung auf dem Gebiet der Umweltmeteorologie den staatlichen Behörden. Ein privater Sektor in der Umweltberatung existiert nicht. Im Meteorologischen Dienst der DDR (zwischenzeitlich Meteorologischer und Hydrologischer Dienst der DDR), gegründet im Jahr 1950, entsteht unter W. Böer und später unter der Leitung von J. Kolbig am Hauptamt für Klimatologie in Potsdam die Abteilung Technische Meteorologie, die zusammen mit dem Forschungsinstitut für Biometeorologie, dem Forschungsinstitut für Hydrometeorologie und dem Forschungsinstitut für Agrarmeteorologie den weiten Bereich der angewandten Meteorologie abdeckt.

Zu den Aufgaben der Abt. Technische Meteorologie gehört die

1976 – 1979	Prof. Dr. W. Fett	Institut für Wasser-, Boden und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes Berlin
1979 – 1981	Prof. Dr. B. Gutsche	Freie Universität Berlin, Meteorologisches Institut
1981 – 1986	Prof. Dr. J. Baumüller	Amt für Umweltschutz, Stuttgart
1986 – 1988	Dr. Ahrens	Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe
1988 – 1992	M. Wilhelm	VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V., Essen
1992 – 1995	W.- J. Kost	TÜV Südwest, Filderstadt
1995 – 1999	Prof. Dr. H. Mayer	Universität Freiburg, Meteorologisches Institut
1999 – 2002	Dr. U. Reuter	Amt für Umweltschutz, Stuttgart
seit 2002	Prof. Dr. W. Kuttler	Universität Essen, Institut für Ökologie

Tab. 1-3: Vorsitzende des AKUMET bzw. des FA UMET der DMG e.V.

25.- 26.3.1964	Symposium „Die Ausbreitung industrieller Luftverunreinigungen in der Atmosphäre“ in Berlin Zeitschrift für Angewandte Meteorologie, Sonderheft (1964)
22.-24.9.1966	Tagung „Technische Meteorologie“ in Dresden Zeitschrift für Meteorologie, Band 20 (1968) Heft 1 - 6
18.- 20.11.1974	Tagung „Die Atmosphäre als Umweltfaktor“ in Potsdam Zeitschrift für Meteorologie, Band 27 (1977) Heft 4
20.-23. 8.1980	Tagung „Klimatologie, eine Grundlage für die meteorologische Betreuung der entwickelten sozialistischen Gesellschaft“ in Halle Zeitschrift für Meteorologie, Band 31 (1981) Heft 2, Heft 3
8.-11.11.1982	Haupttagung „Probleme der Physik der Atmosphäre“ in Schwerin. Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR, Band 18, Nr. 133 (1984) und Nr. 134 (1985)
15.-17.11.1983	Tagung „Arbeitsmethoden und Arbeitsergebnisse einer landschaftsbezogenen Klimatologie“ in Uetz Zeitschrift für Meteorologie, Band 35 (1985) Heft 3
8.-11.12.1986	Hauptjahrestagung „Mesometeorologie – Erkenntnisse, Probleme, Arbeitsmethoden und volkswirtschaftliche Wirksamkeit“ in Reinhardtsbrunn bei Friedrichroda Zeitschrift für Meteorologie, Band 37 (1987) Heft 1, 59-62
3.- 6.12.1990	Haupttagung „Erhöhung der Wirksamkeit meteorologischer Informationen in Wirtschaft und Öffentlichkeit“ in Chemnitz Programm mit Vortragszusammenfassungen

Tab. 1-4: Tagungen der Meteorologischen Gesellschaft der DDR (seit Dez. 1990 Meteorologische Gesellschaft e.V.) mit Bezug zur Umweltmeteorologie.

Beratung des Bauwesens (Bauprojektierung, Bauproduktion), der Energiewirtschaft, des Verkehrswesen und die Betreuung der Bereiche Freiluftbewitterung und Klimaschutz technischer Erzeugnisse (MD 1988). Auch die Beratung der Schifffahrt hinsichtlich der klimatischen und meteorologischen Belastungen der transportierten Güter gehört zeitweilig zum Forschungsbereich. In Zusammenarbeit mit der Handelshochschule Leipzig und der Verpackungsindustrie entstehen dabei auch Arbeiten zur Laderaummeteorologie.

In den Ämtern für Meteorologie (und später in den Regionaldienststellen) bestehen die Hauptarbeitsgebiete in der Bereitstellung von meteorologischen Unterlagen für die Volkswirtschaft und in der gutachterlichen Tätigkeit zu Fragen der Luftreinhaltung. Die Forschung zur Luftreinhaltung wurde im Wesentlichen am Meteorologischen Observatorium Wahnsdorf, aber auch am Meteorologischen Observatorium Potsdam sowie am Aerologischen Observatorium Lindenberg geleistet. Operationelle Beratungen auf dem Gebiet der Umweltkontrolle (z.B. Information über die aktuelle Belastung der Luft mit  $\text{SO}_2$ , Belastungstrends, Vorhersagen der atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen) ergänzen das Leistungsangebot des Meteorologischen Dienstes (MD 1988). In der DDR gelten durch eine Vereinbarung zwischen dem Meteorologischen Dienst und dem Ministerium für Gesundheitswesen 1966 die Formeln von Bosanquet und Pearson für die Gutachterpraxis für verbindlich.

Das Landeskulturgesetz (LKG 1970) stellt die grundlegende Rechtsvorschrift zum Umweltschutz in der ehemaligen DDR dar, das durch entsprechende Durchführungsverordnungen zu Fragen der Reinhaltung der Luft (Schornsteinmindesthöhe, zulässige Emissionsraten und Immissionen) ergänzt wird.

Alle Maßnahmen im Umweltschutz obliegen sowohl dem Ministerium für Gesundheitswesen als auch dem im Jahr 1981 gebildeten Ministerium für Umweltschutz und Wasserwirtschaft. Als Aufsichtsbehörden fungieren seit 1984 die Staatlichen Umweltinspektionen (STREICHER und SCHNEIDER 1991).

Im Hochschulbereich sind auf dem meteorologischen Gebiet des Umweltschutzes zuletzt die Humboldt-Universität (Physik der atmosphärischen Grenzschicht, Stadtklima), die Technische Universität Dresden (Windkanalexperimente, Wirkung der Luftverunreinigungen auf Wälder) und die Universität Leipzig (Stadtobservatorium, urbanes Aerosol) tätig.

Die Diskrepanz zwischen Wirtschaftswachstum und Luftverschmutzung gehört zu den gravierenden Problemen des Umweltschutzes (Abb. 1-3). Die Umsetzung umweltmeteorologischer Kenntnisse hat häufig geringere Priorität gegenüber den ökonomischen Zielen und Zwängen. Die zu 83 % auf schwefelhaltiger Braunkohle basierende Elektroenergieerzeugung, die

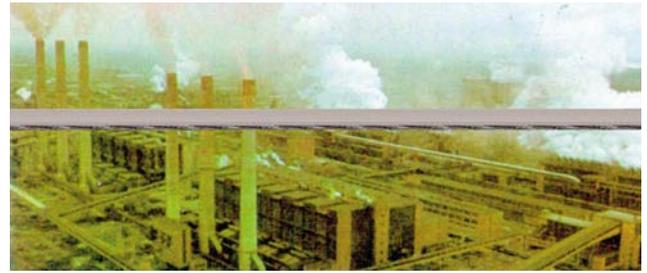


Abb.1-3: Kombinat Schwarze Pumpe. Aus: Meyers Neues Lexikon, 1972.

Raumheizung der Wohnungen überwiegend mit Kohleöfen und die hohen spezifischen Verkehrsemissionen sind wesentliche Ursachen für die teilweise extrem hohen Schadstoffbelastungen von Luft, Boden und Wasser (UMWELTBERICHT 1990).

Die Tagungen der Meteorologischen Gesellschaft der DDR widmen sich zunehmend Themen der Umweltmeteorologie, wie Tab. 1-4 erkennen lässt.

#### 4.2 Zeitraum: 1990 bis zur Gegenwart

Die Umweltmeteorologie ist zum Anfang dieses Zeitraums durch ein großes Projekt geprägt: Die Konzeption zum Verbundforschungsvorhaben „Wissenschaftliches Begleitprogramm zur Sanierung der Atmosphäre über den neuen Bundesländern (SANA)“ entsteht unmittelbar nach der Wiedervereinigung der beiden deutschen Staaten. Die erste Phase erstreckt sich von 1990 bis 1992, die zweite Phase von 1993 bis 1995. Das Projekt SANA hat zum Ziel, die Auswirkungen der in der ehemaligen DDR stattfindenden Veränderungen der Schadstoffemissionen auf die Verteilung, Konzentration und Deposition der primär emittierten und sekundär in der Atmosphäre gebildeten Schadstoffe darzustellen und deren Wirkung auf die Waldökosysteme der ehemaligen DDR zu untersuchen (SANA 1996). In diesen Zeitraum (1992) fällt auch die Gründung des Instituts für Troposphärenforschung e.V. in Leipzig mit dem Auftrag, die physikalischen und chemischen Prozesse der belasteten Troposphäre zu erforschen.

Der Fachausschuss UMET beginnt ab dem Jahr 1990 damit, spezielle Tagungen im Abstand von drei Jahren auszurichten, die inzwischen als „METTOOLS“ (Werkzeuge für die Umweltmeteorologie) schon zu einer Tradition geworden sind (Tab. 1-5). Sie bieten sowohl den auf dem Gebiet der Umweltmeteorologie tätigen Meteorologen als auch den Stadtplanern und Ingenieuren eine geeignete Plattform für den Gedankenaustausch und die gegenseitige Verständigung über die Wechselbeziehung zwischen Meteorologie und Technik bzw. Wirtschaft. Es soll hier nicht unerwähnt bleiben, dass die Tagung „METTOOLS I“ im Februar/März 1990 auf Initiative von M. Schatzmann, Meteorolo-

logisches Institut der Universität Hamburg, und durch Unterstützung des DAAD die erste Möglichkeit nach dem Fall der Mauer bot, dass die Meteorologen aus der noch bestehenden DDR und der BRD wieder zusammen kommen und sich über die zukünftigen Arbeiten zur Umweltmeteorologie austauschen konnten.

Parallel zu den Aktivitäten des FA UMET fördern im Verein Deutscher Ingenieure (VDI) verschiedene Fachbereiche nachhaltig die wissenschaftliche Entwicklung und Anwendung im Bereich Umweltmeteorologie (Tab. 1-6). Im VDI sind innerhalb der **Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL)**, die im Jahr 1957 gegründet wurde, vier Fachbereiche etabliert, die sich mit allen technischen, messtechnischen und meteorologischen Aspekten des Umweltschutzes beschäftigen. Neben den Fachbereichen I: Umweltschutztechnik, III: Umweltqualität und IV: Umweltmesstechnik fungiert der Fachbereich II: Umweltmeteorologie, der sich seinerseits aus zwei Ausschüssen zusammensetzt (seit 2001).

Im Ausschuss „Luftqualität“ werden alle Modellierungen (numerischer Modellierungstechniken, Turbulenzparametrisierung, Windfeld- und Ausbreitungsmodellierung), Modellanwendungen (Windkanalversuche) und Messungen für umweltmeteorologische Belange behandelt.

Der Ausschuss „Klima“ hat im Wesentlichen die Aufgaben des früheren Ausschusses „Angewandte Klimatologie“ (anthropogene Änderungen des lokalen Klimas, Übertragung der Erkenntnisse aus



Abb. 1-4: Umweltmessstation in Trier-Ostallee (Zentrales Immissions-Messnetz Rheinland Pfalz).

Klimatologie und Lufthygiene in Richtlinien und Normen z.B. für räumliche Planungen) sowie des Ausschusses „Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen“ (Schädigungen und Zerstörungen von Objekten, die der Atmosphäre ausgesetzt sind) übernommen (VDI 2001) (Tab. 1-6).

METTOOLS I	28.2. - 1.3.1990 in Hamburg, Universität Hamburg, Simulationsmodelle aus dem Umweltbereich / Repräsentanz, Auswertung und Dokumentation von meteorologischen Messungen sowie von Immissionsmessungen / Planung und Durchführung von umweltrelevanten Freilandexperimenten / Auswirkungen von Landnutzungsänderungen / Behandlung diffuser Quellen Meteor. Rundschau 1991
METTOOLS II	13. - 17. 9.1993 in Stuttgart, Universität Hohenheim Climate / Environmental impact studies /assessments / Immission control / Simulations Meteorol. Zeitschrift, N.F. 3 (1994), Heft 3
METTOOLS III	10. - 12.3.1997 in Freiburg, Universität Freiburg aktuelle Probleme der Umweltmeteorologie, insbesondere Luftreinhaltung / Bewertungsverfahren / aufgabenspezifische Messkonzepte / Modelle in der praktischen Anwendung / planungsorientierte Ergebnisdarstellung / Planungs- umsetzung / Stadtklima 21 Meteorol. Zeitschrift, N.F. 7 (1998), Heft 1
METTOOLS IV	3. - 5.4.2000 in Stuttgart, Universität Freiburg aktuelle Fragen der Umweltmeteorologie / Untersuchungsmethoden / Validierung und Ergebnisdarstellung / Qualitätssicherung Meteorol. Zeitschrift, N.F. Vol. 10, (2001), No. 4
METTOOLS V	6. - 8. Oktober 2003 in Essen, Universität Essen FA Umweltmeteorologie der DMG zusammen mit dem VDI KRdL / I Klima und Planung / II Urbane Grenzschicht und Ausbreitungsproblematik / III Umweltmeteorologie, anlagenbezogener Umweltschutz und regenerative Energien / IV Sensorik, Simulation und Umweltinformation / V Visualisierung von Umweltprozessen

Tab. 1-5: Themenschwerpunkte der Tagungsreihe METTOOLS (Werkzeuge für die Umweltmeteorologie).

In einer Schriftenreihe der Kommission Reinhaltung der Luft finden die Vorträge von Tagungen und Workshops der Fachbereiche ihren Niederschlag. Unter dem Titel „Umweltmeteorologie“ erscheinen drei Bände mit Workshop-Beiträgen zu diesem Thema (zuletzt KRdL 1998).

Die Arbeit der Fachbereiche mündet in Richtlinien (VDI-Richtlinien) und Normen, die von großer Bedeutung für die Berücksichtigung umweltmeteorologischer Sachverhalte in Planungs- und Bewertungsaufgaben sind. Sie sichern bei den Anwendern ein einheitliches und sachgerechtes Arbeiten. Auf dem Gebiet der Umweltmeteorologie gibt es über 33 spezielle Richtlinien zu den Themengruppen: „Meteorologische Messungen“, „Ausbreitung von Luftverunreinigungen“ und „Klima und Lufthygiene in Städten“.

1856	Gründung des VDI in Alexisbad/Harz
13.2.1928	Gründung des VDI-Fachausschusses für Staubtechnik in Berlin
1947	Wiederaufnahme der Aktivitäten des VDI in Ratingen
15.10.1948	Neukonstituierung des Fachausschusses für Staubtechnik (Obmann: Dr.-Ing. R. Meldau)
7.11.1955	Gründung des Ausschusses Reinhaltung der Luft innerhalb der VDI-Fachgruppe Staubtechnik (Obmann: Dr. H. Lent) mit den Aufgaben: 1. Entstehung und Auswurf von Staub und Gasen (Leitung: Dr.-Ing. K. Schwarz) 2. Verbreitung und Niederschlag von Staub und Gasen (Leitung: Dr. Lüder) 3. Wirkungen von Staub und Gasen (Leitung: Prof. Dr. H.O. Hettche) 4. Technische Sonderfragen (Leitung: Dr.-Ing. H. Lent, Dr.-Ing. K. Schwarz und Dr.-Ing. K. Guthmann)
15.3.1957	Gründung der VDI-Kommission Reinhaltung der Luft (1. Vorsitzender: Dr. H. Lent)
August 1960	<i>4 Hauptausschüsse:</i> 1. Entstehung und Verhütung von Emissionen 2. Ausbreitung und Niederschlag von Staub und Gasen (Prof. Dr. Koschmieder) 3. Wirkungen von Staub und Gasen 4. Messtechnik und technische Sonderfragen
1962	<i>4 Hauptausschüsse:</i> 1. Entstehung und Verhütung von Emissionen 2. Ausbreitung und Niederschlag von Staub und Gasen (Prof. Dr. Wippermann) 3. Wirkungen von Staub und Gasen 4. Messtechnik
April 1964	<i>5 Hauptausschüsse:</i> 1. Entstehung und Verhütung von Emissionen 2. Ausbreitung und Niederschlag von Staub und Gasen (Prof. Dr. Wippermann) 3. Wirkungen von Staub und Gasen 4. Messtechnik 5. Sonderfragen
1964	Das öffentliche Einspruchsverfahren und die Bekanntgabe des Richtlinienentwurfs (Gründruck) im Bundesanzeiger wird eingeführt
1969	<i>6 Hauptausschüsse:</i> 1. Entstehung und Verhütung von Emissionen 2. Ausbreitung und Niederschlag von Staub und Gasen (N.N.) 3. Wirkungen von Staub und Gasen 4. Messtechnik 5. Verfahren zur Abgasreinigung 6. Sonderfragen
1976/77	Umbenennung des FB II von „Ausbreitung und Niederschlag von Staub und Gasen“ in „Transport und turbulente Diffusion“
1977	<i>5 Hauptausschüsse:</i> 1. Entstehung und Verhütung von Emissionen 2. Transport und turbulente Diffusion ( Dr. Gilbert) 3. Wirkung von Staub und Gasen 4. Messtechnik 5. Verfahren zur Abgasreinigung , Staubtechnik
1989	Hauptausschuss II „Umweltmeteorologie“ (seit 1988: Prof. Dr. G. Manier) 5 Unterausschüsse: Aufgabenplanung und praktische Anwendung, Meteorologische Messungen, Grenzschichtmodelle, Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen, Angewandte Klimatologie
März 1990	Gründung des Gemeinschaftsgremiums Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Fachbereiche)
23.5.1996	Zusammenlegung der Fachbereiche I und V zum Bereich Umweltschutztechnik
1996	Umbenennung der Fachbereiche in: I Umweltschutztechnik II Umweltmeteorologie III Umweltqualität IV Umweltmesstechnik
20.2.2001	Fachbereich II „Umweltmeteorologie“ (ab 02/2000 Prof. Dr. H. Mayer) 2 Unterausschüsse: Luftqualität, Klima (Vorsitz: ab 02/2003 kommissarisch Prof. u. Dir. W.J. Müller)

Die Aktivitäten auf dem Gebiet der Umweltmeteorologie basieren auf gesetzlichen Grundlagen zum Umweltschutz, die gegenwärtig gravierende Änderungen erfahren. Das betrifft sowohl die Einführung der neuen TA Luft 2000 als auch die Einbindung von EU-Richtlinien, die für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union verbindlich sind. Auch die messtechnische Ausgestaltung der Luftgütemessnetze der Bundesländer ist davon betroffen (Abb. 1-4).

Im Rahmen der von der EU-Richtlinie vom 27.6.1985 und vom Bundesgesetz vom 20.02.1990 geforderten Umwelt-Verträglichkeitsprüfung für bestimmte Anlagen werden zunehmend auch Klimagutachten verlangt. Schließlich bildet die Qualitätssicherung ein wichtiges Thema, da die Umweltmeteorologie in Deutschland im Wesentlichen von einer Reihe von Umweltberatungsbüros im privaten Sektor getragen wird. Die Qualitätssicherung z. B. von Ausbreitungsmodellen richtet sich nach den Vorgaben des Fachbereichs II „Umweltmeteorologie“ der KRdL. Sie gründet sich vor allem auf eine interne Qualitätskontrolle durch den Modellentwickler selbst.

Ausgehend von der Notwendigkeit einer Integration umweltmeteorologischer Kenntnisse in raumbedeutsame Planungen und in die Verfahren der Umwelt-Verträglichkeitsprüfung (UVP) beschreiben REUTER und HOFFMANN (1998) die Potentiale der Umweltmeteorologie. Planungsfragen im Zusammenhang mit der Gestaltung des Stadtklimas

Tab. 1-6:

Entwicklung des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) und der Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN (persönliche Mitteilung von Dr. Brünger, VDI / KRdL).

behandelt der von HÖSCHELE et al. (1995) publizierte Tagungsband eines Deutsch-Japanischen Meetings. Im Kapitel 5 wird der Zusammenhang zwischen Umweltmeteorologie und Planung näher diskutiert.

Auf dem Gebiet der Umweltberatung sind in Deutschland inzwischen über 16 private Berater bzw. Unternehmen tätig, deren Zertifizierung im FA UMET der DMG e.V. vorgenommen wird. Sie beschäftigen sich mit Fragen der Siedlungsklimatologie und der Ausbreitung von Luftverunreinigungen sowie mit der Abgabe von Windgutachten. Außerdem werden umweltmeteorologische Fragestellungen in den entsprechenden Dezernaten der Landes-Umweltämter und natürlich auch in den Geschäftsfeldern des Deutschen Wetterdienstes bearbeitet.

Im Bereich der Hochschulausbildung auf dem Gebiet der Umweltmeteorologie gibt es zwar keinen eigenen Studiengang, jedoch sind diesbezügliche Lehrveranstaltungen sowohl in den Meteorologie-Studiengängen als auch in vielen umweltbezogenen Studiengängen fester Bestandteil der Ausbildung geworden. An der Technischen Universität Cottbus existiert der bisher einzige Lehrstuhl für Umweltmeteorologie und an der Universität Kassel findet man ein Fachgebiet Umweltmeteorologie. Auf speziellen Gebieten wie der atmosphärischen Aerosolforschung gibt es Ausbildungskapazitäten an den meteorologischen Instituten der Universitäten Karlsruhe, Leipzig und Mainz.

Zu den Zukunftsperspektiven in der Umweltmeteorologie sei auf das Kapitel 6 in diesem Heft verwiesen.

**Literatur:**

AHRENS, D., H. MAYER, (Hrsg.), 1988: „Fachtagung ‚Umweltmeteorologie‘ München 1988“. *Univ. München, Meteor. Inst., Wiss. Mitteilung Nr. 61*, 45 S.

AMS, 1999: 11<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology. 10 - 15 January, Dallas, Texas. *Bull. Amer. Meteor. Society*, Boston, 423 S.

AMS, 2000: Glossary of Meteorology. American Meteor. Soc., Boston, 2. Ed., 855 S.

BAUMÜLLER, J., 1999: Emission, Umwandlung, Immission. In: Helbig, A., Baumüller, J., Kerschgens, M. (Hrsg.): Stadtklima und Luftreinhaltung, *Springer-Verlag*, Heidelberg, S. 167-271.

BAUMÜLLER, J., 2000: CD-ROM „Stuttgart 21“, Amt für Umweltschutz, Stuttgart, Version 3.

BENNER, W., 1958: Engineering Meteorology: Weather Influences on Electrical Utility Load Dispatching, *Bull. Amer. Met. Soc.* **39**, 514 – 520.

BIRG, H., 1996: Die Weltbevölkerung. Dynamik und Gefahren. *Verlag C. H. Beck*, München, 142 S.

BÖER, W., 1964: Technische Meteorologie. *B. G. Teubner Verlagsgesellschaft*, Leipzig, 232 S.

BRUNT, D., 1950: Meteorology and engineering, *Cent. Proc. Roy. Met. Soc.*, Band 1, 235 – 238.

CASPAR, J. W., 1973: Die Probleme. Technoklimatologie. *promet*, **4/73**, 1-8.

CHANDLER, T. J., 1976.: Urban climatology and its relevance to urban design., *WMO, Tech. Note No. 149*, Genf, 61 S.

CROW, L. W., 1988: Industrial Meteorology. In: Parker, S. P. (Hrsg.): *Meteorology Source Book. McGraw-Hill Book Company*, New York, S. 114-115.

DFG, 1988: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht, *Deutsche Forschungsgemeinschaft*, Bonn, 93 S.

EMEIS, S., 2000: Meteorologie in Stichworten. *Gebr. Bornträger Verlagsbuchhandlung*, Stuttgart, 199 S.

FABIAN, P., 1992: Atmosphäre und Umwelt – Chemische Prozesse, Menschliche Eingriffe, Ozon-Schicht, Luftverschmutzung, Smog, Saurer Regen. 4. Aufl. *Springer-Verlag*, Heidelberg, 144 S.

FLEMMING, G., 1979: Klima – Umwelt – Mensch. *G. Fischer Verlag* Jena, 160 S.

FOKEN, T. 2003: Angewandte Meteorologie – Mikrometeorologische Methoden. *Springer-Verlag*, Heidelberg, 289 S.

GEIGER, R. 1929: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 4., Neub. erw. Aufl. 1961, *Vieweg & Sohn*, Braunschweig, 646 S.

GRAFEN, K., J. LÖBEL, (Hrsg.), 1988: Environmental Meteorology. Proceedings of an International Symposium held in Würzburg, F.R.G. 29 September - 1 October 1987. *Kluwer Acad. Publ.*, Dordrecht, 653 S.

GRIFFITH, J. F., 1966: Applied Climatology – An Introduction. *Oxford University Press*, Oxford, 118 S.

GRUNDKE, G., 1955: Die Bedeutung des Klimas für den industriellen Standort. Eine Studie auf dem Gebiete der Technischen Geographie. *Ergänzungsheft Nr. 255 zu Petermanns Geographischen Mitteilungen*, 127 S.

GUDERIAN, R., 2000: Arten und Ursachen von Umweltbelastungen. In: Guderian, R. (Hrsg.): *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie*, Band 1A: Atmosphäre., *Springer-Verlag*, Heidelberg, S. 1-60.

HÖSCHELE, K., M. MORIYAMA, H. ZIMMERMANN, (Hrsg.), 1995: Klimaanalyse für die Stadtplanung, *Proceedings of a Japanese-German Meeting Karlsruhe*, September 22-23, 1994. *FZKA 5579*. 155 S.

JARASS, H. D., 1997: Bundes-Immissionsschutzgesetz. Textausgabe mit Sachverzeichnis und einer Einführung. 3. Neub. Auflage. *Deutscher Taschenbuch Verlag*, München, 422 S.

JAUREGUI, E., 1996: Bibliography on Urban Climatology 1992-1995 WMO/TD-No.759, 120 S.

KNOCH, K., 1952: Die angewandte Klimatologie im Rahmen des Wetterdienstes. *Ber. Dt. Wetterd. US-Zone* **38**, S. 435.

KOCH, H. (Hrsg.), 1969: Industriemeteorologie. *VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie* Leipzig, 419 S.

KOST, W.-J., M. WILHELM, 1992: AKUMET – Ein Fachausschuss stellt sich vor. *Ann Meteor. NF* **27**, 362-363.

KRATZER, A., 1937: Das Stadtklima, 2. Auflage, *Vieweg*, Braunschweig / 2. Aufl. 1956, 184 S.

KRdL, 1998: Kommission Reinhaltung der Luft. Schriftenreihe KRdL im VDI und DIN. Band **28**. 3. Workshop des Fachbereichs II Umweltmeteorologie“ 29. und 30. Oktober 1998 TU Darmstadt, 216 S.

LANDSBERG, H., 1981: The Urban Climate. *Int. Geophys. Ser. Vol. 28, Academic Press*, New York. 275 S.

LKG, 1970: Gesetz über die planmäßige Gestaltung der sozialistischen Landeskultur der DDR – *Landeskulturgesetz vom 14.5.1970*, *GBL*, **1**, Nr. 12, S. 67.

LOWRY, W. P., 1974: Project METROMEX, its history, status and future. *Bull. Am. Meteor. Soc.* **55**, 2, 87 – 88.

- MATHER, J. R., 1974: Climatology: Fundamentals and Applications: Kap.11: Climate, Industry, Commerce, And Engineering. *McGraw-Hill Book Company*, New York, 412 S.
- MAYER, H., 1987: Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben STADTKLIMA BAYERN. *Mitt. Geogr. Gesellschaft München* **7**, 119-160.
- MAYER, H., 2000: Umweltmeteorologie am Beginn eines neuen Jahrhunderts. Bilanz und Ausblick. *Gefahrenstoffe – Reinhaltung der Luft* **60**, 9, 327-334.
- MD, 1988: Leistungsangebot. *Meteorologischer Dienst der DDR*. Potsdam, 50 S.
- MONTEITH, J. L., M. H. UNSWORTH, 1973: Principles of Environmental Physics (1973), 2. Auflage 1990, *E. Arnold*, London, 291 S.
- MUNN, R. E., 1959: Engineering Meteorology: The Weathering of Exposed Surfaces by Atmospheric Pollution. *Bull. Amer. Soc.* **40**, No. 4, 172-178.
- OKE, T. R., 1978: Boundary Layer Climates. 372 S. 2<sup>nd</sup> Ed. 1995, *Routledge*, London, 435 S.
- PARKER, S. P. (Hrsg.), 1980: Encyclopedia of McGraw-Hill. Encyclopedia of Environmental Science, *McGraw-Hill*, New York, 858 S.
- REIDAT, R., 1963: Klimadaten für Bauwesen und Technik (Niederschlag), *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* Nr. **86**, Offenbach, 45 S.
- REUTER, U., U. HOFFMANN, 1998: Umweltmeteorologie. Vom Ergebnis zur Planung. *UVP-report* **198**, 5-6.
- SANA 1996: Ergebnisse aus der ersten Phase des Verbundforschungsvorhabens SANA. *Meteorol. Zeitschrift*, N.F. **5**, 179-278.
- SCHLÜNZEN, K. H., 1994: Mesoscale Modelling in Complex Terrain – An Overview on the German Nonhydrostatic Models. *Beitr. Phys. Atmosph.* **67**, 3, 243-253.
- SMITH, K., 1974: Principles of Applied Climatology. *McGraw-Hill Book Company*, London, 428 S.
- STREICHER, D., B. SCHNEIDER, 1991: REGUS: Ein rechnergestütztes System zur Erarbeitung von Gutachten zu meteorologischen Fragen der Reinhaltung der Luft in der ehemaligen DDR und Radebeul. *Meteor. Rundschau* **44**, 1-4, 99-104.
- TA LUFT 1986: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. *Carl Heymanns Verlag*, Köln, 134 S.
- THORNTHWAITE C. W., 1954: Topoclimatology. Proceed. of the Toronto Meteorological Conference 1953. *Royal Meteorological Society*, London, 227-232.
- UMWELTBERICHT, 1990: Umweltbericht der DDR. Informationen zur Analyse der Umweltbedingungen in der DDR und zu weiteren Maßnahmen. Hrsg.: Institut für Umweltschutz Berlin. *Verlag „visuell“*, Berlin, 86 S.
- UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.), 2001: Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland Ausgabe 2000. *Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.*, Berlin, 379 S.
- VDI 2001: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN: Aufbau – Aufgaben – Ergebnisse. Tätigkeitsbericht 2001. *KRdL im VDI und DIN*, Düsseldorf, 85 S.
- WANNER, H., 1986: Die Angewandte Geländeklimatologie – Ein aktuelles Arbeitsgebiet der Physischen Geographie. *Erdkunde*, Band **40**, H.1 1-14.
- WELLBURN, A. R., 1997: Luftverschmutzung und Klimaänderung. Auswirkungen auf Flora, Fauna und Mensch. *Springer-Verlag*, Berlin, 289 S.
- WMO 1970: Urban Climates (Vol. I), Building Climatology (Vol. II). *WMO*, WMO-Tech. Notes No. **108**, 109 S.
- WMO 1997: The Global Atmosphere Watch: Urban Environments – An Emerging Focus. *WMO*, Publ. No. **14** (September 1997), 4 S.

#### Ergänzende Literatur / Monographien:

- BAUMBACH, G. 1993: Luftreinhaltung. 3. Auflage, *Springer-Verlag*, Heidelberg, 461 S.
- BLACKADAR A. K. 1997: Turbulence and Diffusion in the Atmosphere. *Springer-Verlag*, Heidelberg, 185 S.
- HELBIG, A., J. BAUMÜLLER, M. J. KERSCHGENS (Hrsg.), 1999: Stadtklima und Luftreinhaltung. Zweite, vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage. *Springer-Verlag*, Heidelberg, 467 S.
- KUTTLER, W. 2000: Kap. 4.4 Stadtklima. In: Guderian, R. (Hrsg.): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie, Band 1A: Atmosphäre. *Springer-Verlag*, Heidelberg, S. 420-470.
- LÖBEL, J., H. SCHIRMER, (Hrsg.), 1988: Stadtklima und Luftreinhaltung. Ein wissenschaftliches Handbuch für die Praxis in der Umweltplanung, VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, *Springer-Verlag*, Heidelberg, 426 S.
- SCHIRMER H., W. KUTTLER, J. LÖBEL, K. WEBER (Hrsg.), 1993: Lufthygiene und Klima. Ein Handbuch zur Stadt- und Regionalplanung. *VDI-Verlag*, Düsseldorf, 507 S.
- ZENGER, A., 1998: Atmosphärische Ausbreitungsmodellierung. *Springer-Verlag*, Heidelberg, 159 S.

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 partikel-förmiger 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- $\alpha$ -,  $\beta$ - und Meso- $\gamma$ -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-

<b>Umweltmeteorologische Bezugsräume</b>	<b>Untersuchungsgegenstände</b>
<b>Industriegebiete, Verkehrsflächen, Städte</b>	
<b>Gewerbe- / Industriegebiete</b>	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Schlagregen, Spurenstoff- / Lärm- / Geruchsbelastung
<b>Kraftwerke</b>	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoff- / Lärm- / Geruchsbelastung, Nebel- / Glättebildung, Abschattung, Sichtweite
<b>Deponien / Halden / Altlastenflächen</b>	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoff- / Lärm- / Geruchsbelastung
<b>Verkehrswege</b>	Windverhältnisse, Spurenstoff- / Lärmbelastung
<b>Innenstädte</b>	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoff- / Lärmbelastung
<b>Wohngebiete</b>	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Schlagregen, Lärmbelastung
<b>Urbane Grünflächen</b>	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoffbelastung, human-biometeorologische Wohlfahrtswirkungen
<b>Luftleitbahnen</b>	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoffbelastung, Kaltlufttransport, Kühleffekt, Eindringtiefe in Bebauung, human-biometeorologische Wohlfahrtswirkungen, Kaltluftqualität
<b>Land- / Forstwirtschaft</b>	
<b>Landbau, Massentierhaltung</b>	Spurenstoff- / Geruchsbelastung
<b>Waldbau</b>	Strahlungs- / Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, human-biometeorologische Wohlfahrtswirkungen
<b>Sonstiges</b>	
<b>Erholungsgebiete, Heilklimatische Kurorte, Luftkurorte</b>	Luftdruck- / Strahlungs- / Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Spurenstoff- / Lärm- / Geruchsbelastung, human-biometeorologische Wohlfahrtswirkungen
<b>Bagger- / Stauseen</b>	Wind- / Temperatur- / Feuchtigkeitsverhältnisse, Nebel- / Glättebildung, Sichtweite
<b>Regenerative Energien</b>	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, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, Staubbiederschlag, Schwebstaub (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>) sowie Ruß). Je nach Fra-

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

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

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

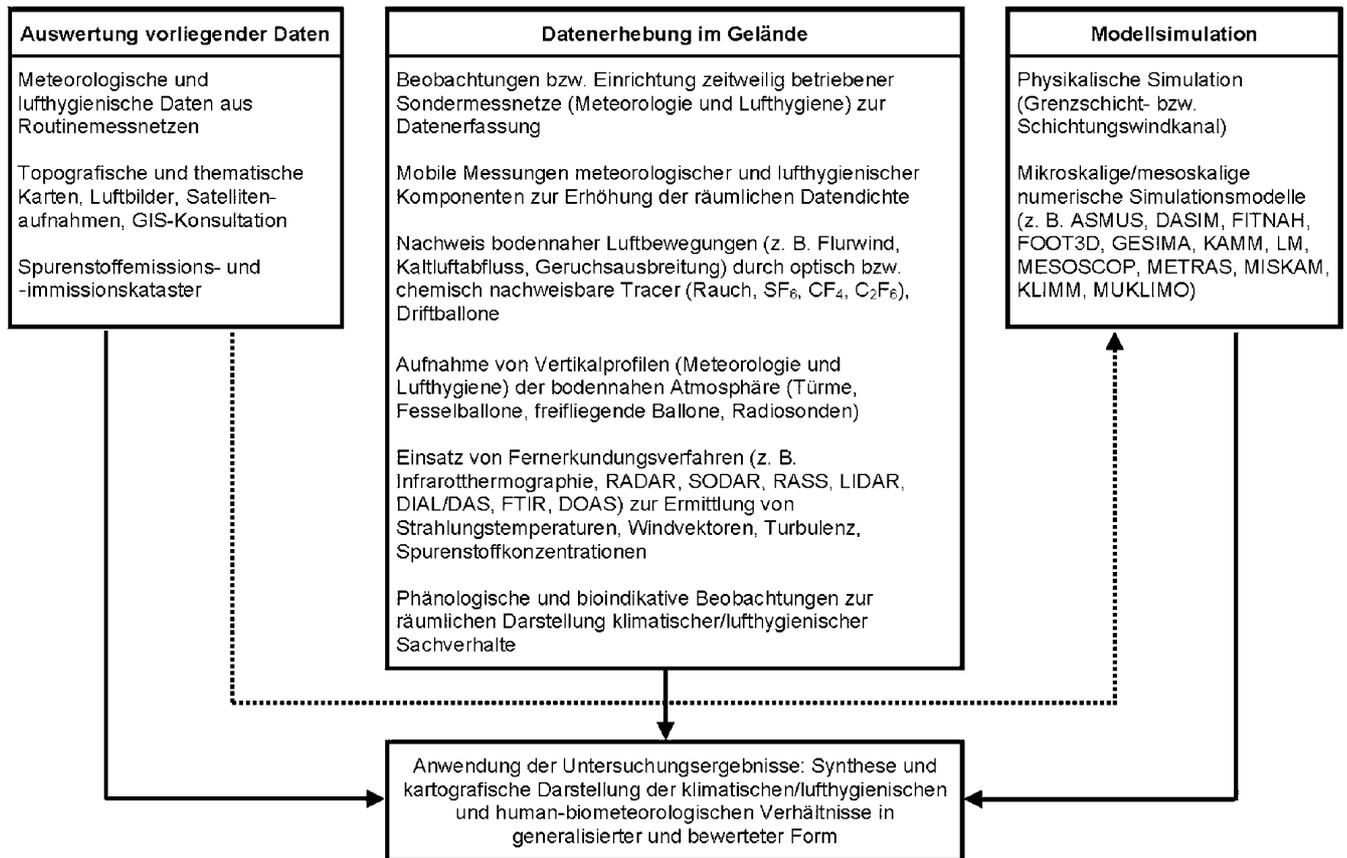


Abb. 2-1: Umweltmeteorologische Untersuchungsmethoden (nach VDI RL 3787, Bl. 9, verändert).

- 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, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, VOC (Foto: Kuttler).

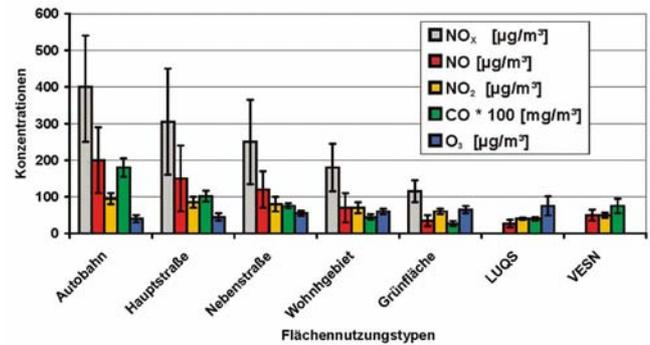


Abb. 2-4: Mittlere Spurenstoffkonzentrationen und Standardabweichungen für verschiedene Flächennutzungstypen im mittleren Ruhrgebiet (nach KUTTNER und WACKER 2001). Datengrundlage: 16 Lufthygienische Profilmessfahrten (jeweils zwischen 9 und 16 Uhr MEZ am 21.2.; 6., 7., 25., 28.4.; 4., 13.5.; 20., 27., 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 KUTTLER 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  $\text{SF}_6$ , Tetrafluormethan  $\text{CF}_4$ , Hexafluorethan  $\text{C}_2\text{F}_6$ ). Die Anwendung von Raucherzeugern hat den Nachteil, dass diese nur visuell und damit qualitativ nachgewiesen werden können. Die Markierungsstoffe  $\text{SF}_6$ ,  $\text{CF}_4$  und  $\text{C}_2\text{F}_6$  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 (KUTTLER 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	
<b>Bodengestützt</b>			
<b>SODAR</b> (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
<b>RASS</b> (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
<b>WPR (Windprofiler RADAR)</b>	P: elektromagnetisch (Mikrowellen) A: ca. 100 m / ca. 10 km	M: 3D-Windvektor, Turbulenz L: Keine F: Keine	
<b>RADAR</b> (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
<b>LIDAR</b> (Light Detection And Ranging), <b>LDA</b> (Laser Doppler Anemometer), <b>DIAL</b> (Differentielles Absorptions LIDAR), <b>DAS-LIDAR</b> (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
<b>FTIR</b> (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
<b>DOAS</b> (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
<b>TDL</b> (Tunable Diode Laser Spektroskopie)	P: elektromagnetisch (Infrarot) A: integrierend / < 1 km	M: keine L: IR-aktive Gase: CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , u.a. F: Keine	SCHIFF et al. 1994
<b>Satelliten- und luftgestützt</b>			
<b>AVHRR</b> (Advanced Very High Resolution Radiometer)/ <b>MSS</b> (Multispectral Scanner)/ <b>GOME</b> (Global Ozone Monitoring Experiment)	P: elektromagnetisch (multispektral) A: < 500 m / 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>5</sup> km	M: Bewölkung, Luftfeuchtigkeit, langwellige Ausstrahlung L: Aerosole, O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HCOH, u. a.. F: Albedo, Landnutzung, NDVI, RVI	BURROWS et al. 1999.
<b>IR</b> (Infrared)	P: elektromagnetisch (Infrarot) A: Satellit: < 500 m, / 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>5</sup> km Flugzeug: < 10 m / 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup> m	M: Bewölkung, Luftfeuchtigkeit, langwellige Ausstrahlung, Oberflächenstrahlungstemperatur L: keine ? F: Landnutzung, NDVI, RVI	PARLOW 1999
<b>VIS</b> (Visible Light)	P: elektromagnetisch (Sichtbares Licht): A: < 500 m / 10 <sup>2</sup> -10 <sup>5</sup> km	M: Bewölkung L: Aerosole F: kurzwellige Albedo	PARLOW 1999, HOFF & MC CANN 2002
<b>VISSR</b> (Visible/IR-Scan Radiometer)	P: elektromagnetisch (Sichtbares Licht, Infrarot): A: < 500 m / 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>5</sup> km	M: Bewölkung, Luftfeuchtigkeit, langwellige Ausstrahlung L: Aerosole F: Oberflächenstrahlungstemperatur, Landnutzung, NDVI, RVI	DLR 2002
<b>SAR</b> (Synthetic Aperture Radar)	P: elektromagnetisch (Mikrowelle): A: < 500 m / 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>5</sup> 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. 5<sup>th</sup> 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. Landespl. 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 SF<sub>6</sub>-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 rars 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. 5<sup>th</sup> 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.

G. GROß, C. ETLING

# 3 Numerische Simulationsmodelle

## 1 Einleitung

Der Großteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Größenordnung einer Stadt oder einer Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis hin zu Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene müssen diese daher in die Mikro- und Mesoskala eingeordnet werden. Beispiele hierfür sind der Einfluß orographischer Hindernisse auf den Wind wie Kanalisierung und Umströmungseffekte, Land-See-Winde, Flurwinde oder auch Düseneffekte in Straßen.

Obwohl die allgemeine Struktur und die physikalischen Ursachen dieser Phänomene im Allgemeinen bekannt sind, gibt es nach wie vor noch offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragung auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen der mesoskaligen Phänomene und deren unterschiedlichem Erscheinungsbild in komplexem Gelände was es extrem schwierig macht, mit Hilfe einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten. Mit Hilfe anderer Untersuchungsmethoden kann dieser Nachteil überwunden werden.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG 1988) wurden gerade in Deutschland eine Reihe nichthydrostatischer mesoskaliger Modelle realisiert. Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen zur Verfügung.

## 2 Meteorologische mesoskalige Modelle

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Grundgleichungen

Alle mesoskaligen Modelle basieren, wie Wettervorhersage- und Klimamodelle auch, auf einem Satz von Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik). Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst noch erweitert werden um z. B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung der stadtklimatologisch wichtigen Größen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden.

Im Hinblick auf eine spätere effiziente Lösung des Gleichungssystems werden diese Modellgleichungen meistens schallgefiltert. Dabei werden die Gleichungen modifiziert und vereinfacht. Für die Schallfilterung werden beispielsweise die Boussinesq-Approximation oder andere Modifikationen der Kontinuitätsgleichung genutzt.

Die Vielzahl der verfügbaren mesoskaligen Modelle unterscheiden sich beispielsweise durch den Umfang des Gleichungssystems und die durchgeführten Approximationen. Die weitaus größten Unterschiede kommen aber durch Art und Anzahl der Parameterisierungen, Komplexität der Anfangs- und Randbedingungen sowie dem verwendeten Lösungsalgorithmus zustande.

Sollen die Verhältnisse im Umfeld urbaner Strukturen mit Hilfe numerischer Simulationsmodelle studiert werden, so ist die Art der Fragestellung für die Auswahl des benutzten Modells von Bedeutung. Für Probleme in Gebieten der Größenordnung 2 km x 2 km und größer müssen mesoskalige Modelle herangezogen werden, bei denen die einzelnen Gebäude nicht explizit aufgelöst werden, sondern lediglich der Gesamteffekt einzelner Bebauungs- und Nutzungskategorien berücksichtigt wird (beispielsweise über eine Bodenrauigkeit).

Ist die Berücksichtigung der Geometrie einzelner Gebäude hingegen für die Lösung des gestellten Problems wichtig, so müssen mikroskalige Modelle verwendet werden. Als wichtige Anwendungsbeispiele

für diese Modelle zählen die Berechnung der Ausbreitung von Luftschadstoffen in Straßenschluchten und die Beurteilung von geplanten Bauten hinsichtlich Durchlüftung und Windkomfort.

Die mikroskaligen Modelle basieren auf den identischen Gleichungen wie mesoskalige Modelle auch. Unterschiede finden sich beispielsweise bei der Durchführung der numerischen Integration (z. B. Größe der Maschenweite, Dauer der Simulation), der skalenabhängigen Parameterisierungen sowie der Behandlung thermischer und hygrischer Effekte. Eines der am weitesten entwickelten Modelle dieses Typs ist das von EICHHORN (1989) beschriebene Programmpaket MISKAM.

### 2.1.2 Parameterisierungen

Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt auf einem numerischen Gitter mit endlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Im Hinblick auf eine konsistente Problembearbeitung werden die Grundgleichungen räumlich und zeitlich gemittelt. Dabei entstehen zusätzliche Terme in den einzelnen Gleichungen, die Korrelationen turbulenter Größen enthalten und für die Bestimmungsvorschriften angegeben werden müssen (Schließungsproblem). Für die unbekanntenen turbulenten Flüsse können prinzipiell weitere prognostische Gleichungen hergeleitet werden (die aber ebenfalls wieder unbekannte Größen enthalten). Üblicherweise begnügt man sich aber mit einer Schließung erster Ordnung, d. h. die turbulenten Flüsse werden mittels eines Gradientansatzes mit den berechenbaren mittleren meteorologischen Variablen verknüpft. Der dabei auftauchende turbulente Diffusionskoeffizient kann empirisch oder aber über die turbulente kinetische Energie bestimmt werden. Im letztgenannten Fall müssen weitere prognostische Gleichungen für die turbulente kinetische Energie und ggf. für die Energiedissipation gelöst werden.

Gerade für umweltmeteorologische Fragestellungen im Bereich von Städten müssen die Effekte größerer Hindernisse wie Gebäude und Baumbestände auf die Verteilung der meteorologischen Variablen auf eine realistische Art und Weise Berücksichtigung finden. Da solche kleinräumigen Strukturen in der Regel nicht explizit aufgelöst werden können (außer mit Einschränkungen bei mikroskaligen Modellen), müssen hierfür entsprechende Parameterisierungen verwendet werden. Die Einführung einer erhöhten Bodenrauigkeit liefert in der Regel keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Daher werden auch andere Ansätze, wie die Einführung eines Formwiderstandes oder einer Porosität in das Gleichungssystem benutzt.

Gerade bei der Entscheidung hinsichtlich der Art der Parameterisierung muss bedacht werden, dass bei steigendem Grad an Komplexität die Anforderungen an

die benötigten Eingangsdaten ebenfalls steigen. Diese Problematik gilt in gleichem Maße für die Entscheidung hinsichtlich der Auswahl der entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen.

### 2.1.3 Anfangs- und Randbedingungen

Zur Lösung der mesoskaligen Modellgleichungen müssen die Anfangs- und Randbedingungen spezifiziert werden. Bei der Berechnung für eine reale Wetterlage (z. B. Smogepisode) müssen für die Initialisierung und den zeitlichen Antrieb Beobachtungen verwendet werden. Steht dagegen die lokal- und regionalklimatologische Besonderheit einer Region im Mittelpunkt des Interesses, so kann der größerskalige Antrieb problemspezifisch vorgegeben werden. Hierfür wäre eine autochthone Wetterlage mit wolkenlosem Himmel und schwachem überlagertem Wind geeignet.

Das Lösungsgebiet für mesoskalige Modelle umfasst nur einen sehr kleinen Ausschnitt der Atmosphäre mit einer horizontalen Erstreckung von wenigen Kilometern. Die größerskaligen meteorologischen Vorgänge können daher von dem mesoskaligen Modell nicht berechnet, sondern müssen über entsprechende Randbedingungen an dem lateralen und dem oberen Rand, beispielsweise in Form einer Nestung, vorgegeben werden.

Die räumliche und zeitliche Verteilung von Temperatur und Feuchte an der Erdoberfläche bestimmen in entscheidender Art und Weise die mesoskaligen Wind- und Temperaturverhältnisse in der bodennahen Atmosphäre. Daher kommt diesem Modellrand eine besondere Bedeutung zu. Temperatur und Feuchte können zwar vorgegeben werden, da deren räumliche und zeitliche Struktur aber extrem variabel ist und durch Messungen kaum flächendeckend und mit der entsprechenden zeitlichen Auflösung verfügbar ist, kommen üblicherweise spezielle Bodenmodelle zum Einsatz. Diese Teilmodelle lösen den Energie- und Wasserhaushalt für den Erdboden und stellen als Ergebnis die benötigten Oberflächenparameter zur Verfügung.

### 2.1.4 Numerische Lösung

Die mathematische Struktur der Grundgleichungen eines mesoskaligen Modells lässt nur in Ausnahmefällen eine analytische Lösung zu. In der Regel ist man auf die Anwendung numerischer Verfahren angewiesen. Die üblicherweise verwendete Lösungstechnik ist die Methode der finiten Differenzen. Dabei werden die im Grundgleichungssystem enthaltenen räumlichen und zeitlichen Differentialquotienten in Differenzenquotienten überführt. Eine kontinuierliche Feldfunktion ist nach einer solchen Überführung nur noch an diskreten Gitterpunkten eines Rechengitters definiert. Der horizontale Abstand dieser Gitterpunkte beträgt bei mesoskaligen Modellen typischerweise 100 m bis 1

km. In der Vertikalen wird eine feinere räumliche Auflösung verwendet, um die großen Variationen der meteorologischen Größen gerade in Bodennähe realistisch erfassen zu können. Typischerweise sind in den untersten Atmosphärenschichten die Abstände der Gitterpunkte im Meterbereich und wachsen nach oben hin an.

## 2.2 Vereinfachte Modelle

Dreidimensionale nichthydrostatische Mesoskalenmodelle sind mächtige Werkzeuge, die für ein breites Spektrum anwendungsorientierter Fragestellungen im Bereich der Umweltmeteorologie zum Einsatz kommen können. Für deren sinnvolle und korrekte Handhabung ist neben einer langjährigen Erfahrung des Anwenders auch die Spezifizierung einer Reihe von Standortparametern notwendig. Für ausgewählte Probleme kann der Aufwand insgesamt minimiert werden, indem das Modellgleichungssystem problemorientiert vereinfacht wird.

### 2.2.1 Eindimensionale Modelle

Bei diesem Modelltyp werden unter der Annahme der horizontalen Homogenität die Gleichungen soweit vereinfacht, dass die meteorologischen Variablen nur noch eine Abhängigkeit von der Vertikalen und der Zeit aufweisen. Aufgrund der gemachten Voraussetzungen sind diese Modelle nur für ausgedehnte Gebiete mit relativ einheitlicher Landnutzung gültig (z. B. Norddeutsches Flachland, große Wasserflächen). Dieser Einschränkung stehen aber eine ganze Reihe von Vorteilen gegenüber:

- es können umfangreiche Parameter- und Prozessstudien durchgeführt werden,
- die vertikale Auflösung kann auch für Simulationen über längere Zeitabschnitte sehr fein gewählt werden (z. B. Simulation zur Bildung von Bodennebel, detaillierte Studien zu den meteorologischen Verhältnissen in landwirtschaftlichen Kulturen),
- es können lange Zeitreihen der meteorologischen Variablen berechnet werden.

Die Abb. 3-1 zeigt die Zeitreihe des 10 m-Windes, wie sie mit einem solchen Modell für den Standort Hannover-Langenhagen für das Jahr 1991 berechnet wurde. Statistische Auswertungen dieses Anemogramms liefern eine gute Übereinstimmung mit vorhandenen Beobachtungen. Mögliche Anwendungsgebiete dieses vereinfachten eindimensionalen Modells sind die Berechnungen langer Zeitreihen als Basis für Ausbreitungsrechnungen für Luftschadstoffe oder auch für die Berechnung des Windenergiepotentials in unterschiedlichen Nabenhöhen.

### 2.2.2 Schichtenmodelle

Bei dreidimensionalen Schichtenmodellen wird der vertikale Aufbau der Atmosphäre nicht durch viele Rechenflächen, sondern nur durch wenige charakteristische Atmosphärenschichten unterschiedlicher Mächtigkeit dargestellt. Der populärste Repräsentant dieses Typs ist das Drei-Schichtenmodell REWIMET (HEIMANN 1986), das auch Eingang in eine VDI-Richtlinie gefunden hat (VDI 1992). Jede der Schichten dieses Modells stellt einen charakteristischen Teil der atmosphärischen Grenzschicht dar. Über einer 50 m mächtigen Prandtl-Schicht folgt eine räumlich und zeitlich variable Mischungsschicht von einigen hundert Metern Dicke. Nach oben wird das Modellgebiet durch eine Schicht abgeschlossen, in der ein Übergang von der Grenzschicht zur reibungsunbeeinflussten Atmosphäre erfolgt. Aufgrund der Verwendung der hydrostatischen Approximation können nur horizontale Maschenweiten von etwa 2 km und größer verwendet werden.

Typische Anwendungsbereiche dieses Modells sind:

- Episodensimulationen (z. B. eine Smogepisode von mehreren Tagen),
- Einzelfallszenarien (z. B. Störfall),
- Ausbreitungsklimatologien (z. B. flächendeckende Häufigkeitsverteilungen verschiedener meteorologischer Größen wie Windrosen).

Die Abb. 3-2 zeigt die räumliche Verteilung der Bodenwindrosen für das Rhein-Main-Gebiet, wie sie mit REWIMET als langjähriges Mittel berechnet wurde

### 2.2.3 Massenkonsistente diagnostische Modelle

Eine stark vereinfachte Methode zur Beschreibung der Windverhältnisse in einer Region stellen die massenkonsistenten Modelle dar (eine Übersicht ist z. B. bei GROß 1996 zu finden). Ausgehend von Beobachtungen wird über Inter- und Extrapolationstechniken ein geschätztes, volumenfüllendes Windfeld konstruiert.

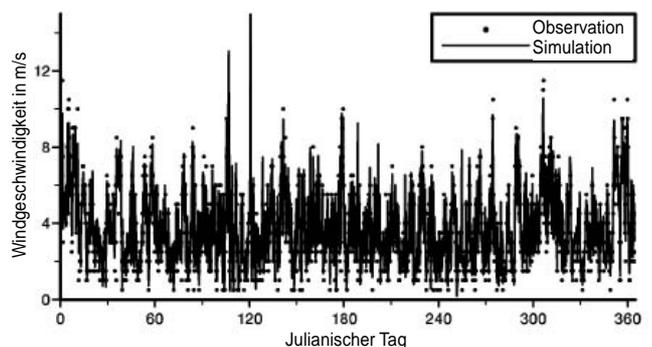


Abb. 3-1: Berechnete Zeitreihe der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund.

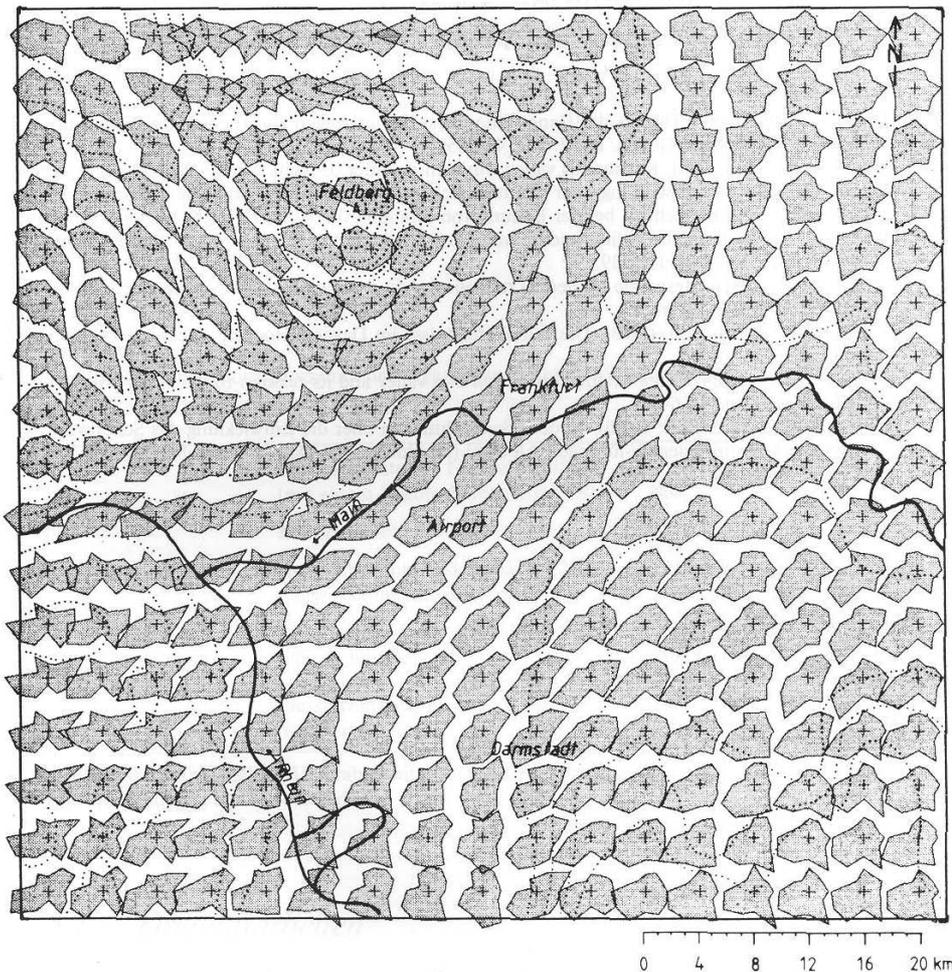


Abb. 3-2: Berechnete Verteilung von Bodenwindrosen im Rhein-Main Gebiet.

Diese vorläufige Verteilung wird anschließend über eine Variationsrechnung unter der Nebenbedingung, dass die Kontinuitätsgleichung erfüllt sein muss, verändert. Von dem gesamten Grundgleichungssystem wird also lediglich die Gleichung für die Massenerhaltung verwendet. Das endgültige Windfeld ist somit massenkonsistent, ist aber in starkem Maße von dem unsicheren, geschätzten Ausgangswindfeld abhängig. Für meteorologische Situationen von geringer Komplexität und für ein landschaftlich nur wenig strukturiertes Gebiet liefert dieser Modelltyp bei Vorhandensein einer ausreichenden Menge an Beobachtungsdaten sehr schnell ein massenkonsistentes Windfeld.

### 2.2.4 Dreidimensionale Modelle

Wie eingangs schon erwähnt, werden seit einigen Jahren gerade in Deutschland hochqualifizierte, leistungsfähige und anwendungsorientierte mesoskalige Modelle entwickelt. Alle diese Modelle basieren auf den gleichen physikalischen Grundlagen mit individuellen problemspezifischen Ergänzungen (z. B. Niederschlagsphysik). Die Modelle unterscheiden sich in der Hauptsache

- bei den gewählten Approximationen und Parameterisierungen (z. B. hoher Bewuchs explizit aufgelöst oder als Bodenrauigkeit berücksichtigt),
- bei den Anfangs- und Randbedingungen und
- bei den numerischen Lösungsverfahren.

Die nachstehende Liste gibt nur einen unvollständigen Ausschnitt der in der Bundesrepublik verfügbaren dreidimensionalen mesoskaligen Modelle wieder (in alphabetischer Reihenfolge)

- FITNAH (**F**low over **i**rrregular terrain with **n**atural and **a**nthropogenic **h**eat sources), GROß (1992),
- FOOT3D (**F**low over **o**rographically structured terrain, **3**-dimensional), BRÜCHER (1997),
- GESIMA (**G**eesthachter **S**imulationsmodell für die **A**tmosphäre), KAPITZA und EPEL (1992),
- KAMM (**K**arlsruher **a**tmosphärisches **m**esoskaliges **M**odell), ADRIAN (1994),
- KLIMM (**K**lima-**M**odell **M**ainz), EICHHORN et al. (1997),
- LM (**L**okal **M**odell des Deutschen Wetterdienstes), STEPELER et al. (2002),
- MESOSOP (**M**esoskaliges **M**odell **O**berpfaffenhofen), SCHUMANN et al. (1987),
- METRAS (**M**esoskaliges **T**ransport- und **S**trömungsmodell), SCHLÜNZEN (1996),
- REWIH3D (**R**egionalwindmodell **h**ydrostatisch **3**-dimensional), HEIMANN (1992).

### 3 Anwendungsbeispiele für mesoskalige Modelle

Alle dreidimensionalen nichthydrostatischen Modelle sind prinzipiell in gleicher Art und Weise geeignet, das breite Spektrum mesoskaliger Phänomene zu simulieren. Aus diesem Grunde wird bei den hier gezeigten Ergebnisbeispielen bewusst auf die Nennung des jeweiligen Modells verzichtet, mit dem das spezielle Ergebnis berechnet wurde.

### 3.1 Nächtliche Kaltluftabflüsse

In orographisch gegliedertem Gelände verursachen nächtliche Temperaturunterschiede zwischen der bodennahen Luft an den geneigten Flächen und derjenigen in gleicher Höhe weiter entfernt davon die Entstehung von Kaltluftabflüssen. Die Stärke, vertikale Mächtigkeit und Reichweite dieses thermischen Windsystems hängt nicht alleine von den orographischen Gegebenheiten wie Geländeneigung und Länge des Hanges ab, sondern auch von den thermischen und mechanischen Eigenschaften des jeweiligen Untergrundes.

Die auf diese Weise entstehenden Luftströme können während der gesamten Nachtstunden beobachtet werden und sind trotz der relativ geringen Windgeschwindigkeiten in der Lage, Luftmasseigenschaften wie Temperatur und Schadstoffe über größere Entfernungen zu transportieren. Sie können bei vorhandenen stadtklimarelevanten Luftleitbahnen zu einer belastungsabbauenden Be- bzw. Entlüftung des städtischen Raumes führen, wenn die herangeführte Luft nicht mit Schadstoffen belastet ist. Aufgrund ihrer hervorgehobenen Bedeutung werden nächtliche Kaltluftabflüsse bei stadtklimatischen Untersuchungen, Bepflanzungsverfahren und integrierten Umweltverträglichkeitsprüfungen besonders berücksichtigt.

In der Abb. 3-3 ist beispielhaft das Ergebnis einer Simulation mit einem dreidimensionalen mesoskaligen Modell für eine autochthone Wetterlage in orographisch strukturiertem Gelände gezeigt. An allen Hän-

gen haben sich Kaltluftabflüsse unterschiedlicher Stärke und Mächtigkeit ausgebildet die in Richtung zu den tiefer gelegenen Teilen des Geländes strömen. In tiefen Mulden sammelt sich die Kaltluft und es bilden sich Kaltluftseen, während in Tälern die Kaltluftabflüsse konvergieren und sich zu Bergwinden formieren. Dieses talachsenparallele Windsystem ist vertikal wesentlich mächtiger als die Kaltluftströme am Hang und verfrachtet die gebildete Kaltluft in Richtung Talausgang.

Numerische Simulationen dieser Art liefern als Ergebnis einen räumlich und zeitlich hochaufgelösten Satz von konsistenten Feldern verschiedener meteorologischer Größen. Diese Daten können weitergehend problemorientiert ausgewertet werden. Beispielhaft kann hierfür genannt werden:

- die Berechnung von Kaltluftproduktionsraten, lokal und Einzugsgebietsabhängig,
- die Berechnung der Luftaustauschraten für einzelne Siedlungsstrukturen und ganze Stadtgebiete,
- die Festlegung der klimaökologischen Relevanz der Kaltluftabflüsse für einzelne Geländeteile in Abhängigkeit von den resultierenden Massenströmen (z. B. VDI 1997),
- die räumliche Zuordnung der sich ausbildenden Kaltluftabflüsse zu den entsprechenden Kaltluftentstehungs- und -einzugsgebieten,
- die Abschätzung der Bedeutung der Hangwinde im Hinblick auf die nächtliche Abkühlung innerhalb von Siedlungen,
- die Berechnung human-biometeorologischer Bewertungsgrößen wie PMV oder PET (z. B. VDI 1998).

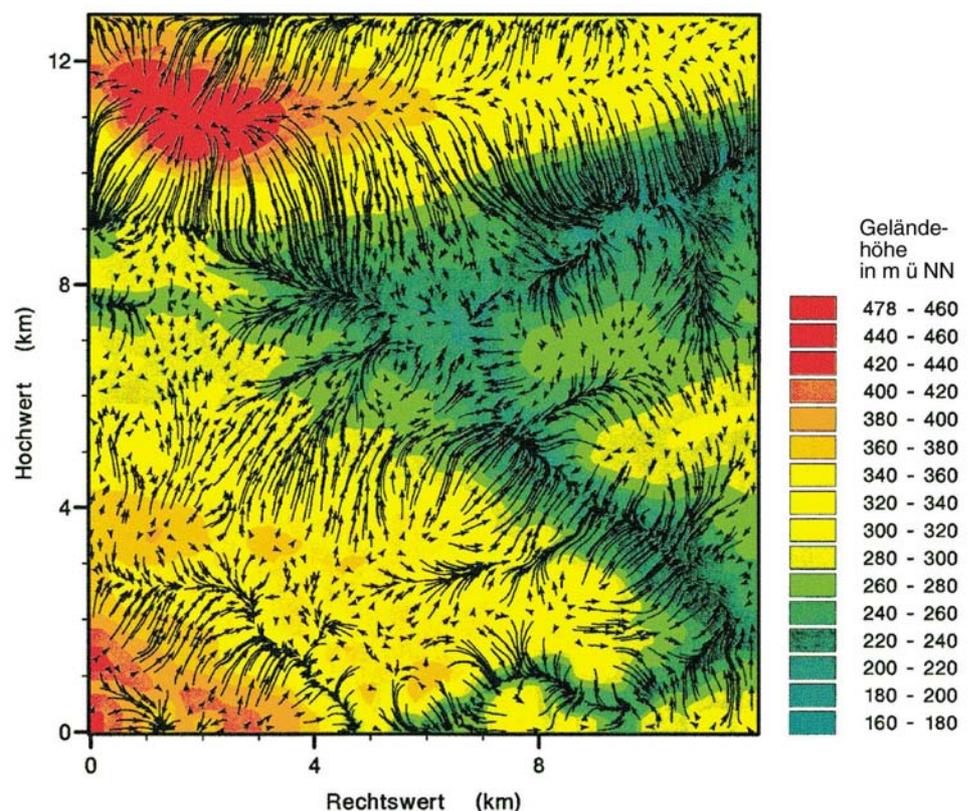


Abb. 3-3:

Berechnete Kaltluftabflüsse in komplexem Gelände für eine Höhe von 10 m über Grund. Der längste Pfeil entspricht einer Windgeschwindigkeit von 2,5 m/s. Die Legende gibt die Geländehöhe in Meter an.

### 3.2 Landnutzungsänderung

Bei geplanten Baumaßnahmen oder auch Landnutzungsänderungen müssen schon im Planungsstadium mögliche negative Auswirkungen beispielsweise auf die Durchlüftungssituation urbaner Räume erkannt und ggf. behoben oder minimiert werden. Für das Auffinden solcher negativer Effekte für Planzustände sind Messungen im Gelände weniger geeignet, da nur real existierende Zustände und keine Plan-Szenarien messtechnisch erfasst werden können. Auch Windkanalexperimente haben ihre Schwächen beim Studium zur Verteilung der meteorologischen Variablen bei autochthonen Wetterlagen mit schwachem Wind und stark veränderlicher thermischer Schichtung.

Mesoskalige Modelle können für die hier relevante Problemstellung als echte Planungsinstrumente eingesetzt werden. Dabei werden zwei Rechnungen durchgeführt, einmal für den Ist-Zustand und einmal für den Plan-Zustand. Durch Vergleich der dabei jeweils erzielten Resultate können Räume abgegrenzt werden, in denen Veränderungen zu erwarten sind und diese Veränderungen können auch quantifiziert werden.

Als Beispiel wird hier der Einfluß von Waldflächen auf das Lokalklima herausgegriffen. Der Grund für die Bedeutung von Wäldern liegt in dem stark unterschiedlichen thermischen Verhalten von bewaldeten Flächen im Vergleich zu Wiesen und Feldern. Während der Nachtstunden kühlt sich die über den Freiflächen lagernde Luft stark ab und in geneigtem Gelände kann dies zur Ausbildung von Kaltluftabflüssen führen. Wälder dagegen schützen mit den dichten Kronen die bodennahe Luft vor einer zu starken Auskühlung. Die

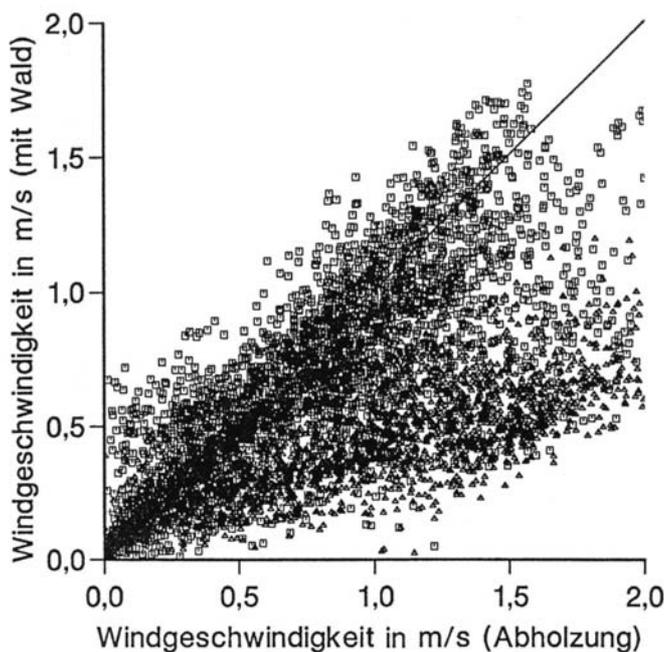


Abb.3-4: Vergleich der simulierten bodennahen Windgeschwindigkeit mit und ohne Wald.

Bestandsluft ist in den Nachtstunden folglich wesentlich wärmer als diejenige in der offenen Flur in gleicher Höhe. Die Abkühlung im Bestand erfolgt nicht am Boden, sondern vorwiegend im oberen Kronendrittel und hier können sich dann ebenfalls Kaltluftabflüsse ausbilden.

Untersuchungen in den letzten Jahren haben gezeigt, dass Wälder in orographisch strukturiertem Gelände wesentlich bessere Kaltluftproduzenten sein können als Wiesen. Es kann ein deutlich größeres Luftvolumen abgekühlt werden, wobei die Temperaturenniedrigung nicht so groß ist. Damit werden Wälder zu gewichtigen lokalklimatischen Faktoren, da sowohl die Temperaturverteilung als auch die Windverhältnisse nachhaltig beeinflusst werden.

Eine Veränderung in der räumlichen Verteilung von Waldflächen, beispielsweise durch Aufforstungen oder Rodungen, hat direkte Auswirkungen auch auf die Umgebung. Die numerische Simulation, die zu den Ergebnissen des vorherigen Abschnittes (Kaltluftabflüsse) geführt haben, werden wiederholt, wobei die Landnutzung Wald an den entsprechenden Rasterzellen durch Freiland ersetzt wird.

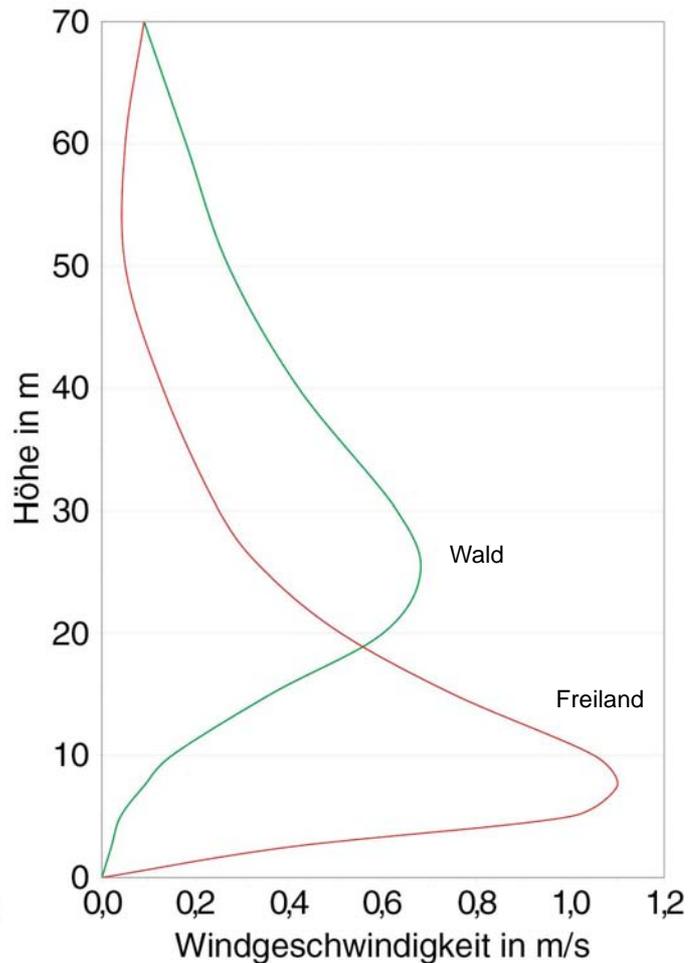


Abb.3-5: Vergleich der simulierten Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit mit und ohne Wald.

In der Abb. 3-4 ist ein Ergebnis gezeigt, dass den Einfluß einer Abholzung deutlich macht. Es sind hier die Ergebnisse des bodennahen Windes für beide Simulationen gegenübergestellt. Deutlich erkennt man zum einen, dass nach Abholzung die Kaltluftabflüsse an Stärke zunehmen, zum anderen aber auch die Wirkung von Wäldern auf die Umgebung, da sich die Punkte nicht entlang der Winkelhalbierenden anordnen, sondern eine breitere Streuung darum aufweisen.

Charakteristische Vertikalprofile von Kaltluftabflüssen bei Vorhandensein von Wald und über Freiflächen sind in der Abb. 3-5 dargestellt. Ausgewählt ist dabei ein Gitterpunkt mit einem dichten Laubwaldbestand und einer Baumhöhe von 20 m. Über der offenen Flur bildet sich ein markantes Geschwindigkeitsmaximum in niedriger Höhe aus mit einer schnellen vertikalen Abnahme. Unter dem Einfluß von Wäldern ist dieses Maximum weniger stark ausgeprägt und in Höhen oberhalb des Bewuchses verschoben. Typischerweise ist der Gesamtmassenfluss durch Kaltluftabflüsse im Bereich von Wäldern höher als derjenige für offenes Gelände, was für Fragen der Durchlüftung von Siedlungsstrukturen von Bedeutung sein kann.

### 3.3 Windpotenzial in komplexem Gelände

Die Wirtschaftlichkeit und die Effizienz von Windkraftanlagen hängt in entscheidender Weise von dem am Standort verfügbaren Windangebot ab. Dieses Angebot kann in idealer Weise aufgrund von Windmessungen vor Ort ermittelt werden. Allerdings müssen solche Messungen direkt am Standort, der im Planungsstadium häufig noch nicht exakt festliegt, und in Nabenhöhe durchgeführt werden und der Messzeitraum muss mindestens ein Jahr oder länger betragen. Da solche Beobachtungen vor Ort sehr zeit- und kostenintensiv sind, werden üblicherweise alternative Methoden zur Anwendung gebracht. Das gängigste Verfahren ist die Übertragung von langjährigen Messungen des Deutschen Wetterdienstes in 10 m über Grund von benachbarten Stationen. Da der Wind eine räumlich und zeitlich sehr stark variierende meteorologische Größe ist, kann eine solche Übertragung auch von unmittelbar benachbarten Standorten mit großen Fehlern verbunden sein. Die Unsicherheiten kommen dadurch zustande, dass der Wind sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit und dem Relief geprägt wird. Weiterhin kann die Extrapolation des 10 m-Windes auf Nabenhöhe zu charakteristischen Unsicherheiten führen.

Neben Messungen bietet die Anwendung von mesoskaligen Simulationsmodellen die Möglichkeit, die lokalen Windverhältnisse unter Umgehung der oben genannten Schwierigkeiten zu bestimmen. In relativ homogenem Gelände (z. B. offshore Standorte, norddeutsche Tiefebene) können auch vereinfachte Modelle zum Einsatz kommen. Unter Vorgabe des wetterla-

genabhängigen Antriebes (z. B. geostrophischer Wind) kann mit Hilfe eines eindimensionalen Modells die langjährige Zeitreihe des Bodenwindes (z. B. Abb. 3-1), gleichzeitig aber auch der Wind in verschiedenen Nabenhöhen berechnet werden. Damit ist die Bereitstellung eines sehr umfangreichen Datensatzes für weitere Auswertungen vorhanden wie:

- direkte, zeitabhängige Berechnung des Energieertrages (z. B. Kurzfristprognose),
- Berechnung statistischer Kenngrößen (Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung) und
- Berechnung des Turbulenzspektrums.

Unter Nutzung des Antriebes aus Ergebnissen von Klimaszenarienrechnungen können diese Untersuchungen auch für die nächsten Jahrzehnte durchgeführt werden.

Die numerische Simulationen, die zu dem in Abb. 3-1 gezeigten Ergebnis geführt haben, sind hinsichtlich Rechenzeit und meteorologischer Eingangsdaten etwas aufwendiger und gelten nur für relativ ebenes, homogenes Gelände.

Der große Aufwand einer durchgängigen Jahresintegration kann drastisch reduziert werden, in dem die Rechnungen nicht für einen langen Zeitraum, sondern für ausgewählte Wetterlagen, die mit einer bestimmten Häufigkeit vorkommen, durchgeführt werden. Bei dieser Vorgehensweise wird das Untersuchungsgebiet aus verschiedenen Windrichtungssektoren mit unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten angeströmt. Zur Berechnung der statistischen Kenngrößen wie Jahresmittel und Häufigkeitsverteilung des Windes werden die derart berechneten Windfelder mit der Häufigkeit des Auftretens der entsprechenden Kombination von Anströmrichtung und Geschwindigkeit gewichtet.

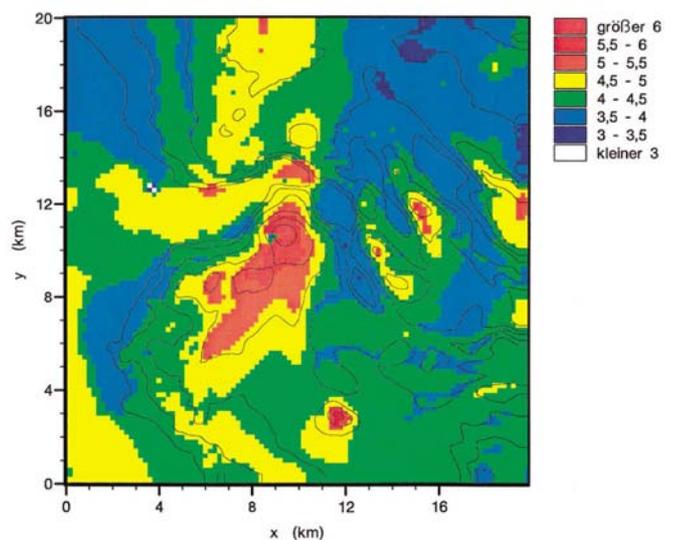


Abb. 3-6: Räumliche Verteilung des Jahresmittels der Windgeschwindigkeit in m/s für eine Nabenhöhe von 50 m über Grund. Die Legende gibt das Jahresmittel in m/s an.

Beispielhaft ist in der Abb. 3-6 das Ergebnis einer solchen Simulation für ein 20 x 20 km<sup>2</sup> großes Untersuchungsgebiet wiedergegeben. Dargestellt ist das berechnete Jahresmittel der Windgeschwindigkeit für eine Höhe von 50 m über Grund. Die unterschiedliche Landnutzung in Kombination mit dem stark gegliederten Gelände beeinflusst die Strömung auch in diesem Niveau. Die mittlere Windgeschwindigkeit weist daher im Untersuchungsgebiet eine hohe Variabilität auf. Sie schwankt zwischen etwa 3 m/s in den Talzügen bis etwa 6 m/s in den höher gelegenen Landschaftsstrukturen. Basierend auf den simulierten statistischen Kenngrößen für den Wind an frei wählbaren Standorten und Nabenhöhen, können die zu erwartenden Energieerträge berechnet werden.

Da die Windverhältnisse als volumenfüllende Informationen vorliegen, können weitere Auswertungen vorgenommen werden. Beispielhaft kann die über die Rotorfläche integrierte Windgeschwindigkeit ermittelt werden, die sich von derjenigen in Nabenhöhe unterscheidet. Die Unterschiede liegen typischerweise bei 0,5 – 1,0 % für landwirtschaftliche Areale, während dieser Wert im Einflussbereich von Waldgebieten mit 1-3 % deutlich höher ausfällt. Die Veränderung bei dem zu erwartenden Energieertrag liegt um den Faktor drei höher.

#### 4 Ausbreitungsmodelle

Die allgemeine Grundlage zur Berechnung der Ausbreitung von Luftschadstoffen in der Atmosphäre ist die Bilanzgleichung für eine Luftbeimengung  $c$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} K_{(ii)} \frac{\partial c}{\partial x_i} + Q_c + R_c \quad (1)$$

Die lokale zeitliche Änderung von  $c$  an einem Ort wird bestimmt durch die Advektion mit dem mittleren Wind  $u_i$  (1. Term), durch die turbulente Diffusion (2. Term) mit dem turbulenten Diffusionskoeffizienten  $K_{(ii)}$  in die drei Raumrichtungen, durch Quellen und Senken  $Q_c$  und bei chemisch reaktiven Stoffen auch durch Wechselwirkungen  $R_c$  mit anderen Luftbeimengungen.

Zur vollständigen Beschreibung der Ausbreitung eines Luftschadstoffes in der Atmosphäre müssen die räumliche und zeitliche Struktur des mittleren Windfeldes, des Turbulenzzustandes der Atmosphäre, die detaillierte Verteilung der Quellen und Senken und die Kenntnis zu den relevanten chemischen Umwandlungen bekannt sein.

Entsprechend den verfügbaren Eingangsdaten, den Anforderungen an den Grad der Genauigkeit der Ergebnisse und der Ressourcen kommen Lösungsverfahren für die obige Gleichung unterschiedlicher Komplexität zum Einsatz (MASSMEYER 1999, SCHLÜNZEN 2002).

#### 4.1 Analytische Modelle

Unter sehr restriktiven Rahmenbedingungen kann die Gl. (1) analytisch gelöst werden:

- alle meteorologischen Eingangsdaten sind zeitlich konstant und räumlich homogen,
- der Ausbreitungsprozess ist stationär und erfolgt in einem nach oben und unten unbegrenzten Raum,
- es erfolgen keine chemischen Reaktionen.

Als Hauptlösung der Gl. (1) erhält man unter diesen Voraussetzungen die sog. Gauß-Lösung, die durch entsprechende Randbedingungen an die Problemstellung angepasst werden kann. Für Luftreinhaltefragen werden auf diese Weise das Gauß-Fahnenmodell abgeleitet, welches bis in die unmittelbare Vergangenheit das Standardinstrument der Immissionsprognose darstellte.

Durch Weiterentwicklungen des Gauß-Modells können die gemachten Restriktionen abgeschwächt werden. So ist beim Gauß-Wolkenmodell die Berücksichtigung zeitlich veränderlicher meteorologischer Bedingungen und Quellstärken in approximierter Form möglich.

#### 4.2 Eulersche Modelle

Weder die meteorologischen Rahmenbedingungen noch die für einzelne Luftbeimengungen charakteristischen Quellen und Senken sind während des Ausbreitungsvorganges in der Atmosphäre konstant. Für eine realistische Beschreibung der Schadstoffverteilung müssen daher die räumlichen und zeitlichen Veränderungen der relevanten Einflussgrößen Berücksichtigung finden. Aus diesem Grunde werden häufig mesoskalige Modelle, Chemiemodelle und Ausbreitungsmodelle in kombinierter Form benutzt und angewendet.

Die zu einem mesoskaligen Modell formal passende Form ist ein Eulersches Ausbreitungsmodell. In konsistenter Form wird die Bilanzgleichung (1) auf einem Rechengitter mit Hilfe numerischer Verfahren gelöst. Veränderungen der meteorologischen Rahmenbedingungen können unmittelbar bei der Ausbreitungsrechnung Eingang finden. Ein weiterer Vorteil ist die relativ einfache Berücksichtigung einer Vielzahl von Quellen und chemischer Reaktionen und Umwandlungen.

Allerdings stehen diesen Vorteilen auch Nachteile gegenüber. So ist durch die gewählte räumliche Diskretisierung des Rechengebietes (horizontale und vertikale Maschenweite) gleichzeitig auch die räumliche Auflösung der Schadstoffkonzentration festgelegt, die als Mittelwert für das jeweilige Gittervolumen zu interpretieren ist. Damit verbunden ist die Schwierigkeit, die Ausbreitung von Emissionen aus Punktquellen in Quellnähe korrekt zu simulieren, da der freigesetzte

Schadstoff sofort auf das gesamte Gittervolumen verteilt wird. Schließlich wird durch das verwendete numerische Verfahren zur Lösung der Bilanzgleichung eine mehr oder minder große numerische Diffusion eingeführt, die die numerische Simulation des Ausbreitungsvorganges markant verfälschen kann.

#### 4.3 Teilchensimulationsmodelle (Lagrange-Modelle)

Die für Eulersche Modelle typischen Probleme und Schwierigkeiten können bei Verwendung einer anderen Klasse von Ausbreitungsmodellen überwunden werden. Bei den Lagrange Modellen wird die Schadstoffausbreitung durch Verfolgen eines großen Partikelkollektivs beschrieben. Aus den berechneten Partikelpositionen lässt sich die Konzentrationsverteilung bestimmen.

Die Bewegung eines solchen individuellen Partikels ergibt sich aus der Integration der Flugbahn  $s$  über die Zeit, die in endliche Abschnitte  $\Delta t$  unterteilt ist.

$$s(t + \Delta t) = s(t) + (\bar{u} + u')\Delta t \quad (2)$$

Die momentane Geschwindigkeit setzt sich aus der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{u}$  und einem turbulenten Anteil  $u'$  zusammen.

Die räumlich und zeitlich variierenden meteorologischen Grunddaten, aus denen  $\bar{u}$  und  $u'$  bestimmt werden, können erneut den Ergebnissen eines mesoskaligen Modells entnommen werden. Während der mittlere Wind direkt als Rechengröße vorliegt, wird der turbulente Anteil über verschiedene Ansätze erschlossen.  $u'$  setzt sich zusammen aus einem korrelierten Anteil, der das Erinnerungsvermögen an die Vorgeschichte der individuellen Flugbahn des Teilchens repräsentiert, und einer reinen Zufallskomponente.

Mit Hilfe von Lagrange-Modellen kann die Ausbreitung von Emissionen aus Punktquellen realistisch berechnet werden bei gleichzeitiger Umgehung der für Eulersche Modelle typischen numerischen Diffusion. Allerdings ist die Berücksichtigung chemischer Umwandlungen schwieriger zu realisieren und die Berechnung der Ausbreitung von emittierten Luftbeimengungen aus mehreren Quellen ist mit einem deutlich höheren Aufwand verbunden. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt insbesondere von der Anzahl der verwendeten Partikel ab, die den Ausbreitungsvorgang repräsentieren.

## 5 Ausbreitungsrechnungen entsprechend TA-Luft 2002

Mit den beschriebenen Ausbreitungsmodellen ist es möglich, die Konzentration von Luftbeimengungen zu berechnen, wie sie durch Emissionen im Umkreis einer Stoffquelle (z. B. Kamin) verursacht werden. In der Praxis ist dies besonders im Rahmen von Genehmigungsverfahren für neue Anlagen von Bedeutung. Aus Gründen der Rechtssicherheit und der Gleichbehandlung sind die Ausbreitungsrechnungen durch gesetzliche Vorschriften geregelt. Bekannt sind z. B. die VDI-Richtlinien zu Problemen der Luftreinhaltung oder die technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, die im Jahr 2002 erheblich verändert wurde.

In der TA-Luft werden neben den Immissionsgrenzwerten für verschiedene Luftbeimengungen (z. B. SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, Staub) auch die Rechenvorschriften zur Ermittlung der Immissionen festgelegt. In der bisher gültigen Fassung der TA-Luft gab es zwei Grenzwerte, den Jahresmittelwert und das 98 %-Perzentil, das zur Abschätzung von Spitzenbelastungen herangezogen wurde. In der seit 2002 gültigen TA-Luft werden zwei neue Grenzwerte für Spitzenbelastungen eingeführt, die Überschreitungshäufigkeit des Tagesmittelwertes und des Stundenmittelwertes. Neben diesen Änderungen hinsichtlich zulässiger Grenzwerte sind besonders bei der Vorschrift über die Ausbreitungsrechnung deutliche Änderungen vorgenommen worden. In der bisher gültigen TA-Luft wurden die Zusatz-Immissionen mittels des Gauß-Modells berechnet. Als Eingabedaten waren dazu neben Lage der Quelle und Stärke der Emissionen von meteorologischer Seite Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie die Ausbreitungsparameter (Streuungen in der Gaußverteilung) notwendig. Die Kombination der meteorologischen Parameter wurde in der Ausbreitungsklassenstatistik nach Klug/Manier zusammengefasst.

In der TA-Luft 2002 wurde das Gauß-Modell durch ein Lagrange-Modell (VDI 2000) ersetzt. Als meteorologische Eingangsparameter werden neben Windgeschwindigkeit und Windrichtung nun auch Turbulenzgrößen, wie z. B. Vertikalprofile der turbulenten kinetischen Energie, benötigt. Um einheitliche Rechenergebnisse bei der Anwendung des vorgeschriebenen Lagrange-Modells zu gewährleisten, sind die Eingangsparameter für solche Modelle in einer VDI-Richtlinie (VDI 2002) festgelegt worden. Insgesamt wird der Aufwand zur Berechnung der Zusatzbelastungen für Gase und Stäube deutlich erhöht. Andererseits sind in die neuen Rechenvorschriften die Erkenntnisse der atmosphärischen Grenzschichtforschung der letzten Jahrzehnte eingeflossen, womit die praktische Ausbreitungsrechnung auf eine wissenschaftlich fundierte Basis gestellt wird.

Das gemäß TA-Luft zu verwendende Partikelmodell wurde anhand von Ausbreitungsexperimenten und analytischen Lösungen validiert. Verifikationstest, die ein Partikelmodell zu erfüllen hat, um für TA-Luft konforme Ausbreitungsrechnungen verwendet werden zu können, sind im Anhang D der VDI-Richtlinie 3945 „Partikelmodell“ (VDI 2000) ausführlich beschrieben. Die Verifikationen umfassen einen Homogenitätstest, die Validierung des Algorithmus der Deposition, Tests zur Aufweitung einer punktförmigen Partikelwolke (Taylor-Theorem), die Aufweitung einer Partikelfahne aus einer Punktquelle (Berljand-Lösung), die Modellierung der Abgasfahnenüberhöhung sowie den Transport von Partikeln in einem dreidimensionalen Windfeld.

Die Turbulenzparameterisierung für ein Lagrange Modell gemäß VDI-Richtlinie 3945 (VDI 2000), wurde anhand von Ergebnisse aus Windkanalmessungen (hohe Punktquellen) und Ausbreitungsexperimenten (bodennahe Quellen) validiert. Diese Verifikationstests zur Turbulenzparameterisierung sind in Kapitel 6 der VDI-Richtlinie 3783 (VDI 2002) näher beschrieben.

### 5.1 Vorgehensweise

In der Regel werden Ausbreitungsrechnungen auf der Grundlage meteorologischer Zeitreihen, in denen Wind- und Turbulenzdaten als Stundenmittel vorliegen, über jeweils ein Jahr durchgeführt. Dies bedeutet, dass für jede Stunde des Jahres an vorgegebenen Aufpunkten die Konzentration eines Stoffes und gegebenenfalls die Deposition am Erdboden berechnet werden. Durch die Verwendung einer Zeitreihe können zeitabhängig und damit zum Teil unter anderen Ausbreitungsbedingungen emittierende Quellen (z. B. Tag-Nacht Betrieb) berücksichtigt werden. Die Emissionsparameter der Quelle sind hierzu ebenso wie die meteorologischen Daten für ein Jahr als Stundenmittelwerte vorzugeben. Neben Jahresmittelwerten der Immissionskonzentration können auch Tages- und Stundenmittel sowie deren Überschreitungshäufigkeiten berechnet werden. Ausbreitungsrechnungen können auch, wie nach dem alten TA-Luft Verfahren, auf der Basis einer mehrjährigen Häufigkeitsverteilung von Ausbreitungssituationen durchgeführt werden, sofern Windgeschwindigkeiten kleiner als 1 m/s am betrachteten Standort in weniger als 20 % der Jahrestunden auftreten. Die Verwendung einer solchen Häufigkeitsverteilung ist weiterhin sinnvoll bei zeitlich konstant emittierenden Quellen, wobei das Ausbreitungsmodell dann die entsprechenden Jahresmittelwerte liefert.

Das Rechengebiet sollte einen Kreis mit dem Radius der 50-fachen Schornsteinbauhöhe umschließen. Die Bodenrauigkeit des Geländes wird durch eine mittlere Rauigkeitslänge beschrieben, die aus entsprechenden

Landnutzungskatastern abgeleitet bestimmt werden kann. Unebenheiten des Geländes sollten berücksichtigt werden, wenn innerhalb des Rechengebietes Höhendifferenzen zum Emissionsort von mehr als dem 0,7-fachen der Schornsteinbauhöhe und Steigungen von mehr als 1:20 auftreten. Gebäude im Nahbereich eine Quelle sind zu berücksichtigen, wenn die Schornsteinbauhöhe weniger als das 1,7-fache der Gebäudehöhe beträgt.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung für ein Rechengebiet das aus einem Raster von Aufpunkten besteht, dienen der Auswahl von Beurteilungspunkten. In der Regel sind zwei Beurteilungspunkte auszuwählen, so dass sowohl eine Beurteilung des vermutlich höchsten Risikos durch langfristige Exposition als auch durch kurzfristige Spitzenbelastung ermöglicht wird. Die Immissionshöhe beträgt 1,5 m.

### 5.2 Beispiel einer Ausbreitungsrechnung

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Ausbreitungsrechnung für SO<sub>2</sub> dargestellt. Für SO<sub>2</sub> ist in der TA-Luft als Immissionswert zum Schutz der menschlichen Gesundheit ein Jahresmittelwert von 50 µg/m<sup>3</sup> festgelegt sowie ein Tagesmittel von 125 µg/m<sup>3</sup> mit drei zulässigen Überschreitungen und ein Stundenmittel von 350 µg/m<sup>3</sup> mit 24 zulässigen Überschreitungen im Jahr.

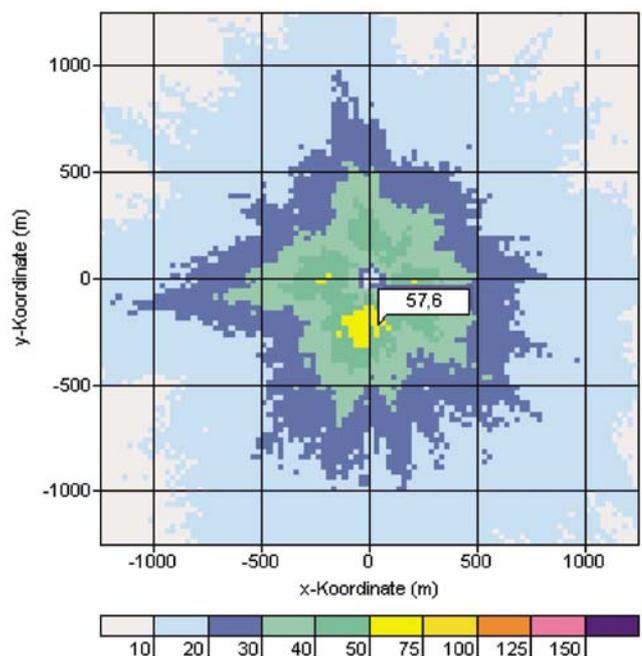


Abb. 3-7: Tagesmittelwert der Zusatzbelastung durch SO<sub>2</sub> in µg/m<sup>3</sup> mit 3 Überschreitungen im Jahr.

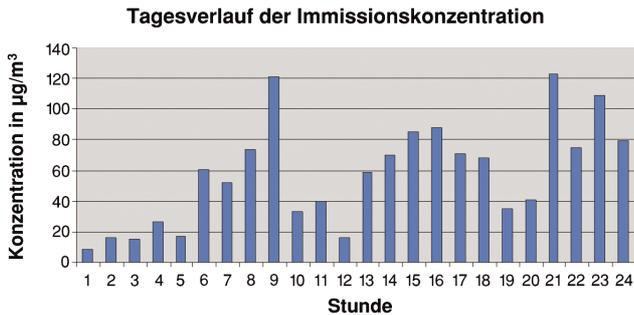


Abb. 3-8: Typischer Tagesgang SO<sub>2</sub> Immissionskonzentration in µg/m<sup>3</sup>.

Im Nullpunkt des Koordinatensystems eines Rechengebiets von 2,5 x 2,5 km<sup>2</sup> Größe befindet sich eine Quelle in 25 m über Grund. Exemplarisch wird in der Abb. 3-7 der Tagesmittelwert dargestellt, der nur 3 mal im Jahr überschritten wird.

Der eingezeichnete Zahlenwert markiert den maximalen Tagesmittelwert der Immissionskonzentration in µg/m<sup>3</sup>, der nur 3 mal im Jahr überschritten wird. Der höchste Tagesmittelwert wird an einem Frühlingstag bei Nordwind erreicht. Abb. 3-8 zeigt den Tagesgang von SO<sub>2</sub> für eine solche Wetterlage.

Das Maximum des Jahresmittelwertes liegt östlich der Quelle. Die Beurteilungspunkte sind nun so zu legen, dass einer im Bereich des maximalen Jahresmittelwertes liegt, also östlich der Quelle, ein zweiter südlich der Quelle um Spitzenbelastungen beurteilen zu können. Außerdem soll nach Möglichkeit die Lage der Beurteilungspunkte so gewählt werden, dass sie Bereiche, in denen sich Menschen aufhalten bzw. Schutzgüter exponiert sind überdecken.

## Literatur

- ADRIAN, G., 1994: Zur Dynamik des Windfeldes über orographisch gegliedertem Gelände. Ber. *Deutscher Wetterdienst*, Offenbach **188**, 141 S.
- BRÜCHER, W., 1997: Numerische Studien zum Mehrfachnesting mit einem nicht-hydrostatischen Modell. *Mitt. Inst. Geophys. Meteorol. Univ. Köln* **119**, 115 S.
- DFG, 1988: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht, *Deutsche Forschungsgemeinschaft*, Bonn, 93 S.
- EICHHORN, J., 1989: Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modelles. Dissertation, *Meteorolog. Institut der Univ. Mainz*.
- EICHHORN, J., K. CUI, M. FLENDER, T. KANDBINDER, W.-G. PANHANS, R. RIES, J. SIEBERT, T. TRAUTMANN, N. WEDI, W.G. ZDUNKOWSKI, 1997: A three-dimensional viscous topography mesoscale model. *Beitr. Phys. Atmosph.* **70**, 301-317.
- GROß, G., 1992: Results of supercomputer simulations of meteorological phenomena. *Fluid. Dyn. Res.* **10**, 483-498.
- GROß, G., 1996: On the applicability of numerical mass-consistent wind field models. *Bound.-Layer Meteorol.* **77**, 379-394.
- HEIMANN, D., 1986: Estimation of regional surface layer wind field characteristics using a three-layer mesoscale model. *Beitr. Phys. Atmosph.* **54**, 492-501.
- HEIMANN, D., 1992: Three-dimensional modeling of cold fronts interacting with northern Alpine foehn. *Meteor. Atmos. Phys.* **48**, 139-163.
- KAPITZA H., D. EPEL, 1992: The non-hydrostatic mesoscale model GESIMA. Part I: dynamic equations and tests. *Beitr. Phys. Atmosph.* **65**, 129-146.
- MASSMEYER, K., 1999: Modelle zur Simulation der Ausbreitung von Luftbeimengungen. In: Stadtklima und Luftreinhaltung, Helbig, Baumüller, Kerschgens (Hrsg.), *Springer-Verlag*, Heidelberg, 467 S.
- SCHLÜNZEN, K. H., 1996: Validierung hochauflösender Regionalmodelle. Berichte aus dem ZMK, Met. Inst. Univ. Hamburg **23**, 184 S.
- SCHLÜNZEN, K. H., 2002: Simulation of transport and chemical transformations in the atmospheric boundary layer – review of the past 20 years developments in science and practice. *Meteorol. Z.* **11**, 303-313.
- SCHUMANN, U., T. HAUF, H. HÖLLER, H. SCHMIDT, H. VOLKERT, 1987: A mesoscale model for the simulation of turbulence, clouds and flow over mountains: formulation and validation examples. *Beitr. Phys. Atmosph.* **60**, 413-446.
- STEPPELER, J., G. DOMS, G. ADRIAN, 2002: Das Lokalmodell LM. *promet* **27**, 123-128.
- TA-Luft, 2002: Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft) vom 30.07.2002 (GMBL., 25-29), Bonn.
- VDI, 1992: Regionale Ausbreitung von Luftverunreinigungen über komplexem Gelände. Modellierung des Windfeldes I. VDI Richtlinie 3783 **Blatt 6**, *Beuth-Verlag*, Berlin, 43 S.
- VDI, 1997: Klima und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI Richtlinie 3787 **Blatt 1**, *Beuth-Verlag*, Berlin, 73 S.
- VDI, 1998: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima. VDI Richtlinie 3787 **Blatt 2**, *Beuth-Verlag*, Berlin, 29 S.
- VDI 2000: Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle – Partikelmodell. VDI-Richtlinie 3945 **Blatt 3**, *Beuth-Verlag*, Berlin, 60 S.
- VDI 2002: Umweltmeteorologie – Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. VDI-Richtlinie 3783 **Blatt 8**, *Beuth-Verlag*, Berlin, 42 S.

# 4 Gerüche

C.-J. RICHTER, W.-J. KOST, R. RÖCKLE

## 1 Einführung

Die dichter werdende Besiedlung, die geringere Akzeptanz gegenüber Umweltbelästigungen sowie das höhere Umweltbewusstsein der Bevölkerung haben dazu geführt, dass die Problematik „Gerüche“ in vergangenen Jahren eine hohe Bedeutung erlangt hat. Wer nimmt nach dem Bezug seines neuen Eigenheims schon gern in Kauf, dass ein benachbarter Betrieb Gerüche freisetzt, die nicht ins gewünschte Bild, z. B. eines nachmittäglichen Kaffees, passen. Dabei ist es unerheblich, ob die viel gerühmte „gute Landluft“, die Bäckerei, die Schokoladenfabrik, die Kompostierungsanlage oder gar eine Tierkörperverwertungsanlage riecht. Geruchsstoffimmissionen können von allen Anlagen, die Gerüche freisetzen, als belästigend empfunden werden.

In der Praxis ergeben sich häufig folgende Fragestellungen:

- a) Ein geruchsemitterender Betrieb erweitert sich und setzt mehr Gerüche frei oder rückt näher an Wohnbebauung heran,
- b) Die Wohnbebauung rückt näher an emittierende Betriebe heran,
- c) Ein bestehender Betrieb verursacht erhebliche Geruchsbelästigungen und wird von der Behörde aufgefordert, Maßnahmen zu ergreifen.

In den Fällen (a) und (b) ist aus planerischer Sicht auf das mögliche Konfliktpotenzial zu reagieren. Als Beispiel zeigt Abb. 4-1 eine typische Situation, in der eine Gemeinde ein neues Wohngebiet ausweisen will. Zwei geruchsemitterende Industriebetriebe legen Widerspruch ein, da sie Geruchsbeschwerden der zukünftigen Anwohner befürchten. Da im betreffenden Gebiet hauptsächlich südwestliche Windrichtungen auftreten, ist die Befürchtung berechtigt. Mit welchen Geruchsimmissionen zu rechnen ist, kann z. B. über Emissionsmessungen und anschließende Ausbreitungsrechnungen ermittelt werden (vgl. Abschnitt 5.1).

Befragungen ergaben, dass sich „alteingesessene“ Bürger ebenso belästigt fühlen wie neu zugezogene Bürger (Neubürger). Der im allgemeinen höhere Bildungsstand der Neubürger und deren niedrigere Hemmschwelle gegenüber Behörden führen jedoch dazu, dass sich dieser Personenkreis eher bereit ist, sich zu beschweren.

Gemäß Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) werden Gerüche der Kategorie „belästigend“ zugeordnet, d. h. gesundheitliche Schäden werden zunächst nicht unterstellt. Erst wenn das Kriterium „erhebliche Belästigung“ erreicht wird, greift der Schutzaspekt des

BImSchG. In diesem Fall hat der Betroffene prinzipiell einen Anspruch auf Abhilfe.

Hieraus ergibt sich die Frage, ab wann eine Geruchsbelästigung als „erheblich“ einzustufen ist. Versuche, darauf eine schlüssige Antwort zu geben, hat es in den vergangenen Jahren vielfach gegeben. Fast alle Untersuchungen stammen aus Nordrhein-Westfalen, da speziell in diesem Bundesland die örtliche Nähe und enge Verzahnung zwischen Wohn- und Industriegebieten (Rhein/Ruhrgebiet) schon früh Anlass zu Problemen gab. Dieser Umstand führte dazu, dass die Behörden gezwungen waren, sich dieses Problem anzunehmen. Einen Überblick über die bisherigen Bewertungsmaßstäbe vermittelt Abschnitt 4.2.

## 2 Physiologische Grundlagen

Der Geruchssinn kann instinktive Reaktionen, z. B. Luftanhalten und Fluchtreflex bei brenzlichem Geruch, Vermeidungsreflexe bei Verwesungsgeruch usw. auslösen. Ferner existiert ein Erinnerungsvermögen für Gerüche, die man im Laufe seines Lebens kennen gelernt hat (z. B. landwirtschaftliche Gerüche, Kaffeegeruch,

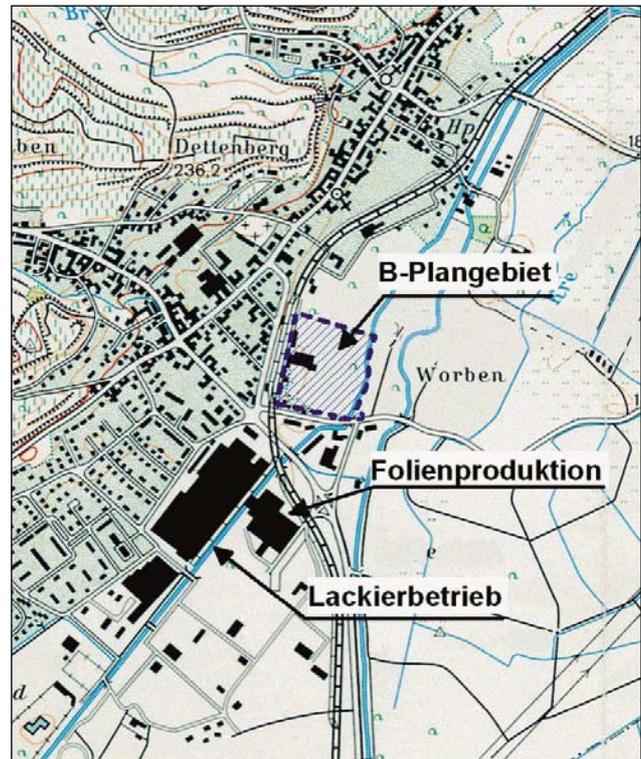


Abb. 4-1: Eine Gemeinde will ein Wohngebiet (blau schraffiert) in der Nähe zweier geruchsemitterender Industriebetriebe ausweisen.

Geruch nach Vegetation, siehe auch PLATTIG 1998).

Die Geruchsempfindung wird beim Menschen durch 10 bis 20 Millionen Riechzellen, die sich in der Kuppel der Nasenhöhle befinden, vermittelt. Die eingeatmete Luft gelangt nicht direkt an die Riechregion, sondern wird in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit am hinteren Rand der Nasenmuschel rückläufig umgelenkt. Diese Wirbelbildung kann durch Schnüffeln, d. h. das stoßweise Einatmen von Luft, verstärkt werden.

Die Intensität der Geruchsempfindung hängt üblicherweise vom Logarithmus der Geruchsstoffkonzentration ab:

$$I = k \cdot \log (c/c_0) \tag{1}$$

$c_0$  = Geruchsstoffkonzentration an der Geruchsschwelle

$c$  = Geruchsstoffkonzentration

$k$  = Weber-Fechner-Koeffizient der physiologischen Wahrnehmung (Größenordnung:  $k=2,5$ )

Dies bedeutet unter anderem, dass eine Verringerung der Geruchsstoffkonzentration um 50 % (also eine Halbierung der Anzahl der Geruchsmoleküle pro  $m^3$ ) nicht in gleichem Maße eine Verringerung der Geruchsintensität bedeutet.

### 3 Beurteilungsmaßstäbe

Geruch ist – analog zu Lärm – ein Immissionsproblem. Ein Betrieb, der sich weitab von Wohngebieten oder sonstigen Aufenthaltsbereichen von Menschen befindet, darf hohe Geruchsemissionen aufweisen, ohne störend zu wirken. Aus diesem Grund bereitet die Beurteilung von Gerüchen den Genehmigungs- und Überwachungsbehörden oft große Schwierigkeiten.

Erste Ansätze zur Behandlung von Geruchsimmissionen sind bereits in der TA Luft von 1974 aufgeführt, werden dort jedoch sehr allgemein gehalten. Konkretere Ausführungen beinhaltet die „Raffinerie-Richtlinie“ (RARI), die in Nordrhein-Westfalen im Jahr 1975 als Richtlinie für die Verwaltung eingeführt wurde und sich mit Kohlenwasserstoff- und Geruchsemissionen und -immissionen aus Raffinerien befasst. In der RARI wurden erstmals „Grenzwerte“ in Form von *maximalen jährlichen Häufigkeiten* von Geruchseinwirkungen angegeben. Die Ausführungen der RARI flossen 1984 in einem gemeinsamen Runderlass ein, der für die Behörden des Landes Nordrhein-Westfalen bindend war. Er wurde jedoch – mangels besserer Beurteilungsmaßstäbe – auch in anderen Bundesländern angewandt.

Umfangreiche Untersuchungen zur Belästigungswirkung von Gerüchen wurden vom Medizinischen Institut für Umwelthygiene (MIU) der Universität Düsseldorf durchgeführt (WINNECKE und STEINHEIDER 1998). Dabei wurden objektive Geruchserhebungen durch geschulte Probanden sowie gleichzeitige Befragungen von Anwohnern in der Umgebung geruchsemitterender Betriebe durchgeführt. Trotz großer Streuung der Resultate bestätigte sich der in der RARI

aufgeführte Zusammenhang zwischen Belästigungsgrad und der „Häufigkeit von Geruchsstunden“. Eine Stunde zählt dann als „Geruchsstunde“, wenn anlagentypischer Geruch mindestens 6 min innerhalb der Stunde wahrgenommen wird.

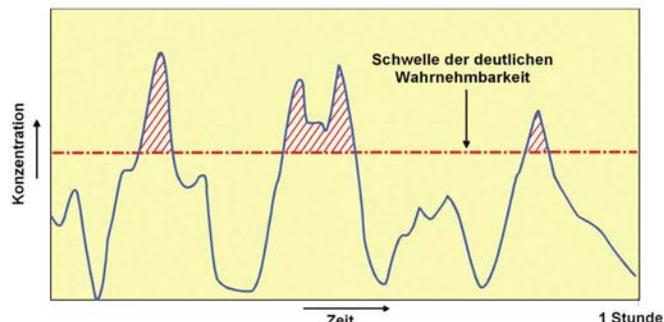


Abb. 4-2: Möglicher zeitlicher Konzentrationsverlauf. Geruch ist nur in den rot schraffierten Konzentrationsbereichen wahrnehmbar.

Abb. 4-2 verdeutlicht diese Definition anhand eines möglichen Konzentrationsverlaufs. Man erkennt in dieser Abbildung, dass der Geruch erst oberhalb einer bestimmten Schwellenkonzentration, der „Geruchsschwelle“, wahrgenommen wird.

Das Konzept „Geruchsstunde“ wird folgendermaßen begründet: Ein durchschnittlicher Mensch, der befragt wird, ob es während der vergangenen Stunde gerochen habe, wird antworten „es hat die ganze Zeit gerochen“, obwohl es objektiv nur 6 oder mehr Minuten gerochen hat. Verantwortlich hierfür ist das Erinnerungsvermögen.

Die Grenze der „erheblichen“ Belästigung wird in einer vom Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) entwickelten GIRL (**Geruchsimmissions-Richtlinie**, vom 13. Mai 1998) definiert. Eine Geruchsbelastung ist dann als erheblich einzustufen, wenn die in Tab. 4-1 aufgeführten Geruchsstunden-Häufigkeiten überschritten werden (BOTH und MÜLLER 2003):

Wohn-/Mischgebiete	10 %
Gewerbe-/Industriegebiete	15 %

Tab. 4-1: Immissionswerte für Geruch entsprechend Geruchsimmissions-Richtlinie (GIRL): Relative Häufigkeiten von Geruchsstunden pro Jahr.

In Wohngebieten sollten also nicht mehr als 10 % der Stunden eines Jahres als Geruchsstunden vorliegen. Die in Tab. 4-1 aufgeführten Häufigkeitsschwellen gelten allerdings nur für industriell bzw. gewerblich bedingte Gerüche. Gerüche aus der Vegetation, dem Kfz-Verkehr, dem Hausbrand sowie weitere ortsübliche Gerüche werden üblicherweise nicht als belästigend eingestuft.

Häufig wird beanstandet (KOCH 1998), dass die Art des Geruchs in der GIRL nicht hinreichend berücksichtigt werde. Beispielsweise wird eine Bäckerei genauso wie

eine Deponie behandelt, obwohl sich die Gerüche in ihrer hedonischen Wirkung (angenehm ... unangenehm) unterscheiden. Dem wird entgegen gehalten, dass selbst ein zunächst als angenehm eingestuft Geruch bei häufiger Beaufschlagung als unangenehm empfunden wird.

Dennoch werden zurzeit Untersuchungen durchgeführt, die ggf. zu einer Modifikation der o. g. Immissionswerte führen können.

#### 4 Ermittlung der Geruchsemissionen

##### 4.1 Messtechnik

Obwohl Gerüche ein Immissionsproblem darstellen, kommt der messtechnischen Ermittlung von Geruchsemissionen eine hohe Bedeutung zu. Dies hat folgende Gründe:

- Die Geruchsemission ist eine Eingangsgröße für Ausbreitungsrechnungen (analog zum Massenstrom eines Luftschadstoffes, z. B. von SO<sub>2</sub>),
- Auf der Basis von Emissionsmessungen können die relevanten Geruchsquellen eines Betriebs ausfindig gemacht werden,
- Der Geruchsminderungsgrad von Abluftreinigungsanlagen (z. B. Aktivkohlefilter) kann quantitativ bestimmt werden.

Bisher existieren keine exakten und routinemäßig anwendbaren chemisch-analytischen Messmethoden, um die Geruchsstoffkonzentration in der Abluft eines Betriebs zu ermitteln. Aus diesem Grund bedient man sich der indirekten Messmethode „Olfaktometrie“ (siehe Abb. 4-3).

Die zu analysierende geruchsbehaftete Luft wird in Beuteln, die aus einem geeigneten geruchsneutralen Material bestehen müssen, gesammelt. Anschließend wird sie in einem geruchsneutralen Raum von Probanden (VDI 3881, Blatt 1 bis Blatt 4 überführt in DIN EN 13725 2003) ausgewertet.

Für die Auswertung werden mindestens vier Probanden benötigt, die über eine normale Riechempfindlichkeit verfügen. Die Empfindlichkeit der Probanden wird anhand ihrer Geruchsschwelle für die Testsubstanzen n-Butanol (typisch für Lösemittel) und H<sub>2</sub>S (typisch für biogene Stoffe) geprüft. Die Geruchsschwelle für diese Testsubstanzen muss innerhalb vorgegebener Grenzen liegen.

Um die Geruchsstoffkonzentration der Abluft zu analysieren, wird den Probanden zunächst Neutralluft angeboten. Dies geschieht mit Hilfe einer speziellen Verdünnungsapparatur (Olfaktometer), wobei die Luft aus Atemmasken ausströmt. Anschließend wird die Abluft aus dem Beutel in zunehmender Menge hinzu dosiert, wobei unterschwellig, d. h. in hoher Verdünnung, begonnen wird. Die Probanden prüfen die an-

gebotene Mischluft auf einen Geruchsreiz. Falls die Mischluft riecht, wird dies von den Probanden bestätigt.

Aus dem Verhältnis der Volumenströme von Abluft und Neutralluft, bei dem die Geruchsschwelle zum ersten Mal erreicht wird, wird die Verdünnungszahl *Z* berechnet:

$$Z = \frac{V_G + V_N}{V_G} \tag{2}$$

*V<sub>G</sub>* = Volumenstrom der Geruchsstoffprobe an der Geruchsschwelle,

*V<sub>N</sub>* = Volumenstrom der Neutralluft an der Geruchsschwelle.

Die Verdünnungszahl *Z* ist ein Maß für die Geruchsinintensität. Ein hoher Wert von *Z* bedeutet, dass die Abluft sehr stark verdünnt werden muss, damit sie nicht mehr riecht. Die Entscheidung „es riecht“ oder „es riecht nicht“, kann von geübten und geprüften Probanden sehr gut reproduziert werden.

Die Messreihe wird dreimal wiederholt, d. h. jeder Proband hat von der gleichen Probe die individuelle Verdünnungszahl *Z* dreimal zu finden. Über die individuell von allen Probanden gefundenen Verdünnungszahlen wird durch geometrische Mittelung die mittlere Geruchsstoffkonzentration bestimmt.

Als Maß für die Emission von Gerüchen gilt der „Geruchsstoffstrom“. Er ergibt sich durch Multiplikation der Geruchsstoffkonzentration mit dem Volumenstrom. Seine Einheit ist „GE/h“, analog zu „kg/h“ bei einem klassischen Schadstoff.

Besondere Probleme bereiten Flächenquellen (Kläranlagen, Deponien, Kompostmieten, ...), da diese keinen definierten Volumenstrom besitzen. Zur Bestimmung der Geruchsemissionen muss man sich bei diesen Quellenarten indirekter Probenahme- und Messmethoden bedienen. Teilweise sind diese Methoden in der Meteorologie bekannt, z. B. bei der Bestimmung von Stoffübergängen in die Atmosphäre.

Die Emissionsermittlung von Gerüchen wird üblicherweise von Messinstituten durchgeführt, die nach §§ 26,



Abb. 4-3: 4 Probanden und Messleiter.

28 BImSchG von den Umweltministerien der Bundesländer zugelassen werden und die spezielle Qualitätsanforderungen erfüllen müssen.

#### 4.2 Praktische Anwendung

Als Beispiel enthält Abb. 4-4 den Geruchsstoffstrom von Presslingen, die aus Bioabfall bestehen. Mehrere Presslinge werden auf einer Palette gelagert und in einer Rottehalle während etwa 30 Tagen zu Frischkompost verarbeitet. Insgesamt besitzt das hier untersuchte Kompostwerk einen Durchsatz von 60.000 t Bioabfall pro Jahr.

Um die Geruchsemission des Kompostwerkes zu ermitteln, wurde der Geruchsstoffstrom aus Presslingen unterschiedlichen Alters olfaktometrisch bestimmt (RICHTER et. al. 1998). Anschließend wurde aus den Einzelwerten eine Ausgleichsgerade berechnet (siehe Abb. 4-4).

Man erkennt, dass der spezifische Geruchsstoffstrom exponentiell in Abhängigkeit vom Alter der Presslinge abnimmt. Durch Integration wurde der Geruchsstoffstrom aller Presslinge im vorliegenden Fall zu  $320 \cdot 10^6$  GE/h bestimmt.

Ausbreitungsrechnungen (siehe Abschnitt 5) bestätigen, dass durch das Kompostwerk erhebliche Belästigungen in der Umgebung hervorgerufen werden. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Abluft der Rottehalle zu reinigen. Um hierfür das richtige Abluftreinigungs-Konzept zu finden, wurden im Rahmen eines Vorversuchs verschiedene Abluftreinigungssysteme hinsichtlich ihres Geruchsminderungsgrads überprüft. Abb. 4-5 zeigt die Wirksamkeit der untersuchten Abluftreinigungsanlagen.

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigten, erreichen Biofilter die höchsten Geruchsminderungsgrade und besitzen zudem eine Geruchscharakteristik, die sich nur unwesentlich vom natürlichen Hintergrund unterscheidet. Somit entschied sich das Kompostwerk für einen Biofilter. Die immissionsseitige Verbesserung wurde ebenfalls mittels Ausbreitungsrechnungen (siehe Abschnitt 5) bestimmt.

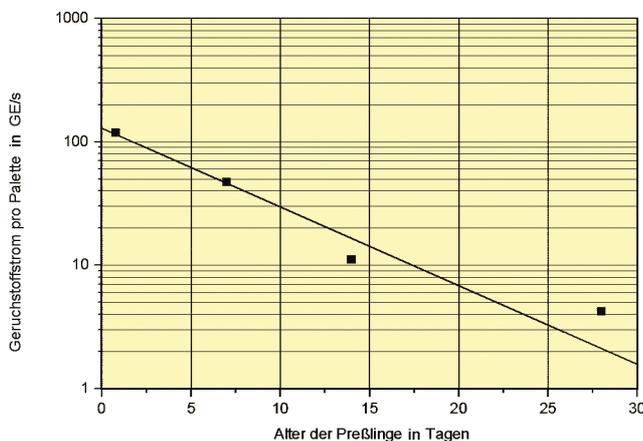


Abb. 4-4: Geruchsstoffstrom von Kompost-Presslingen unterschiedlichen Alters.

## 5 Ermittlung der Geruchsimmission

Maßgebend für eine Belästigung durch Gerüche sind die *Geruchsstoffimmissionen*. Diese können entweder durch direkte Messungen (Begehungen, siehe Abschnitt 5.2) oder durch Ausbreitungsrechnungen (siehe Abschnitt 5.1) ermittelt werden. Die Ausbreitungsrechnungen sind der Hauptgrund dafür, weshalb sich Meteorologen mit der Thematik „Gerüche“ beschäftigen.

Der Vollständigkeit halber wird hier noch eine stark vereinfachende Methode erwähnt, die häufig bei Planungen angewandt wird. Es handelt sich um „Mindestabstände“ zwischen geruchsemitternden Betrieben und einer vorhandenen oder geplanten Wohnbebauung. Diese „Mindestabstände“ sind in Nomogrammen in Form von Kurvenscharen dargestellt. Solche Nomogramme existieren für landwirtschaftliche Betriebe (siehe z. B. VDI-Richtlinie 3471). Eingangsparemeter sind der Tierbesatz, die Haltungform, die Fütterungsart und weitere Größen, die insbesondere die Emissionssituation betreffen. Es leuchtet ein, dass ein für eine bestimmte Tierhaltungsanlage so ermittelter „Mindestabstand“ gleichbedeutend mit einer kreisförmigen Abstandslinie ist und die örtlichen meteorologischen Ausbreitungsverhältnisse dabei nicht berücksichtigt werden.

### 5.1 Ausbreitungsrechnung

Gerüche breiten sich zwar wie gasförmige Luftschadstoffe aus, d. h. ein Ausbreitungsmodell sollte prinzipiell in der Lage sein, die Ausbreitung von Gerüchen zu berechnen, aber die Beurteilung des Belästigungsgrades erfolgt nicht über eine Mittelwertsbetrachtung. Ausbreitungsmodelle liefern üblicherweise nur Stundenmittelwerte der Konzentration. So wird in der TA Luft ein Verfahren angegeben, mit dem für jede Ausbreitungssituation, d. h. für jede Kombination aus Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Turbulenzklasse die Immissionskonzentration an einem vorgegebenen Aufpunkt berechnet werden kann.

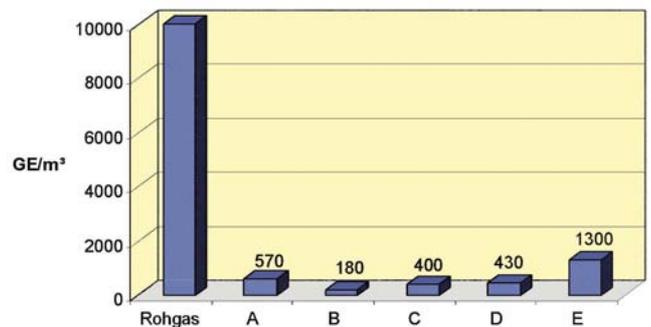


Abb. 4-5: Geruchskonzentrationen im ungereinigten Abgas (Rohgas) sowie nach Durchströmen von unterschiedlichen Abluftreinigungsanlagen. A: UV-Oxidation; B, C, D: Biofilter unterschiedlicher Hersteller; E: Oxidation der Geruchsstoffe durch Besprühen mit ozonangereichertem Wasser.

Zur Einschätzung der Geruchssituation sind jedoch, wie bereits erwähnt, nicht Stundenmittelwerte, sondern die Häufigkeit momentaner Geruchsspitzen von Interesse (siehe Konzept der „Geruchsstunde“, Abb. 4-2). So gilt der in Abb. 4-2 dargestellte Konzentrationsverlauf auch bei konstanter Emission, da die Konzentrationsfluktuationen u. a. durch die atmosphärische Turbulenz hervorgerufen werden.

Aus diesen Ausführungen ergibt sich, dass ein Geruchsausbreitungsmodell in der Lage sein muss, die Häufigkeitsverteilung der Konzentrationen innerhalb des Mittelungszeitraums zu liefern.

Bisher gibt es hierfür zwei Modellkonzepte:

**Modellkonzept 1**

Dieses Konzept beruht auf zwei Schritten (siehe z. B. SCHUMACHER 2001):

Schritt 1: Berechnung des Stundenmittelwertes der Geruchsstoffkonzentration. Hierfür wird ein „übliches“ Ausbreitungsmodell, bisher meistens ein Gaußmodell, verwendet.

Schritt 2: Annahme einer Häufigkeitsverteilung der Geruchsstoffkonzentrationen um den in Schritt 1 berechneten Mittelwert.

Das Modellkonzept basiert auf Untersuchungen, die unter anderem von MEDROW et. al. (1984), MEDROW (1991) und DE LA RIVA et. al. (1991) durchgeführt wurden. Es bildete die Grundlage der zwischenzeitlich zurückgezogenen VDI-Richtlinie 3782, Blatt 4. Es leuchtet ein, dass die Funktion, die die Häufigkeitsverteilung der Geruchsstoffkonzentration darstellt, von mehreren Parametern, unter anderem der atmosphärischen Turbulenz, der Quellhöhe, der Quellentfernung abhängen muss. In der o. g. VDI-Richtlinie wurde hier-

für eine Gamma-Funktion verwendet. In anderen Umsetzungen der Richtlinie wurden aber auch logarithmische Funktionen angesetzt.

Eine weitere Umsetzung dieses Modellkonzepts ist das häufig verwendete „TA-Luft-Faktor-10-Modell“. Laut diesem Modell liegt eine Geruchsstunde dann vor, wenn der Stundenmittelwert der Geruchsstoffkonzentration größer oder gleich  $0,1 \text{ GE/m}^3$  ist. Das Modell verwendet also ein Verhältnis von 10:1 zwischen den Konzentrationsspitzen und dem Mittelwert. Der Stundenmittelwert wird mit Hilfe des Gaußschen Ausbreitungsmodells, das in der TA Luft von 1986 beschrieben ist, berechnet. Wie man unschwer erkennt, stellt dieses Modell einen Grenzfall dar: Bei Stundenmittelwerten, die kleiner als  $0,1 \text{ GE/m}^3$  sind, kann das Kriterium „Geruchsstunde“ (mindestens 6 min Geruchsstoffkonzentrationen mit deutlicher Wahrnehmung  $> 1 \text{ GE/m}^3$ ) auf keinen Fall mehr erfüllt sein.

Obwohl das TA-Luft-Faktor-10-Modell keinen weiteren physikalischen Hintergrund besitzt, wird es in der gutachtlichen Praxis häufig angewandt. Ein Grund liegt darin, dass die vom Modell prognostizierten Geruchsstunden üblicherweise etwas zu hoch sind und somit auf der sicheren Seite liegen. Ferner zeigen Begehungen, dass das Modell in vielen Fällen gut mit Beobachtungen übereinstimmt.

Als Anwendung des TA-Luft-Faktor-10-Modells ist in Abb. 4-6 die Verteilung der Geruchsstunden in der Umgebung des in Abschnitt 4.2 beschriebenen Kompostwerks a) ohne Abluftreinigung, b) mit Abluftreinigung dargestellt (aus RICHTER et. al. 1998). Man erkennt eine deutliche Reduktion der Geruchsstunden-Häufigkeiten aufgrund der Installation einer Abluftreinigungsanlage. Die Ergebnisse von Geruchsbegehungen, die drei Jahre nach Installation der Abluftreinigungsanlage durchgeführt wurden, zeigen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Für das TA-Luft-Faktor-10-Modell gelten alle Einschränkungen des Gauß'schen Ausbreitungsmodells, d. h. es kann z. B. kein Gelände- oder Gebäudeeinfluss berücksichtigt werden.

Eine Weiterentwicklung, die allerdings nur die Berechnung des Mittelwertes betrifft, ist das „LASAT-Faktor-4-Modell“ (RÜHLING und LOHMEYER 1998; HARTMANN 2002). Bei diesem Modell wird der Stundenmittelwert mit

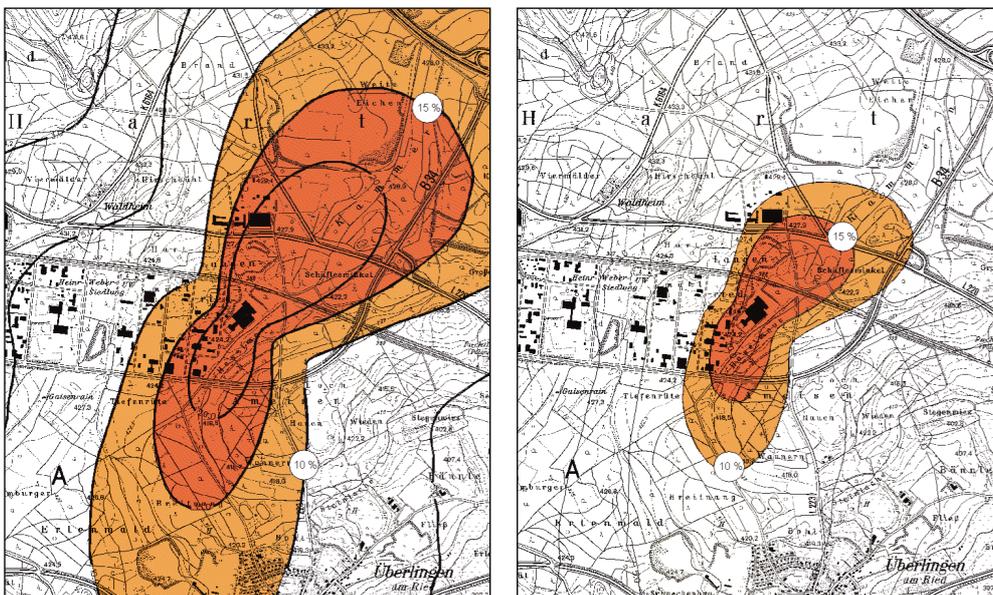


Abb. 4-6: Geruchsstundenhäufigkeiten in der Umgebung eines Kompostwerkes für den Fall „offene Rottehalle“ (linkes Bild) und „geschlossene Rottehalle, Abluftreinigung über Biofilter“ (rechtes Bild)

dem Lagrange-Partikel-Modell LASAT (JANICKE 2001) berechnet und anschließend mit dem Faktor 4 multipliziert. Falls das Ergebnis der Multiplikation größer als  $1 \text{ GE/m}^3$  ist, liegt eine Geruchsstunde vor. Mit diesem Modell ist es prinzipiell möglich, Gebäudeeinflüsse und unebenes Gelände zu berücksichtigen. Der Faktor 4 gilt allerdings nur für niedrige Quellen (effektive Quellhöhe bis etwa 20 m). Bei höheren Quellen sollte ein größerer Faktor verwendet werden.

### Modellkonzept 2

Etwa seit Mitte der 90er Jahre werden neuere Wege zur Berechnung der Geruchsausbreitung beschritten. Das erste Ergebnis stellt die VDI-Richtlinie 3788, Blatt 1 dar, die allerdings nur grundlegende Anforderungen an Geruchsausbreitungsmodelle beinhaltet. Eine Umsetzung eines neuen Konzepts wurde mit dem Modell MEPOD durchgeführt (JANICKE 1999). Es beruht ebenfalls auf zwei Schritten:

Schritt 1: Berechnung einer „momentanen Kernfahne“ ohne Berücksichtigung des Mäanderns mit einem Euler-/Gauß-Modell,

Schritt 2: Simulation des Mäanderns der Kernfahne.

Obwohl es sich um ein viel versprechendes Konzept handelt, sind die Arbeiten derzeit ins Stocken geraten. Ein Grund hierfür ist die generelle Umstellung der allgemeinen Ausbreitungsberechnung hin zum Lagrange'schen Ausbreitungsmodell und weg vom alten Gauß-Ansatz durch Umsetzung der TA Luft 2000.

### Sonderfälle

Die bisher aufgeführten Modelle gelten streng genommen nur für ebenes Gelände sowie Bereiche, in denen Gebäudeeinflüsse vernachlässigbar sind. Obwohl diese Bedingungen nicht immer eingehalten werden, liefern die Modelle häufig brauchbare Ergebnisse. Sonderuntersuchungen sind jedoch immer dann notwendig, wenn

- die Ausbreitung im unmittelbaren Nahbereich von Gebäuden untersucht werden muss und
- Kaltluftabflüsse bei der Ausbreitung eine wesentliche Rolle spielen.

Im Folgenden wird beispielhaft die Ausbreitung innerhalb von Kaltluftabflüssen dargestellt. Im betrachteten Fall befindet sich ein Neubaugebiet am Fuß einer Deponie (siehe Abb. 4-7). Aufgrund von gehäuften Beschwerden, insbesondere in wolkenarmen Nächten, bestand der Verdacht, dass sich die Gerüche innerhalb von Kaltluftabflüssen ausbreiten. Um die Situation näher zu untersuchen, wurden Modellrechnungen sowie Begehungen durchgeführt (RÖCKLE und RICHTER 1998). Die berechneten Strömungsverhältnisse sowie die Ausbreitung der Geruchsfahne sind in Abb. 4-8 dargestellt.

Man erkennt, dass die Gerüche zunächst in westliche Richtung verfrachtet werden und dann zum Wohngebiet umbiegen.

Die Ergebnisse der Geruchsbegehungen sind in Abb. 4-9 dargestellt. Man erkennt eine qualitative gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen.

Die aus den Berechnungen und Messungen gewonnenen Erkenntnisse konnten in Planungsempfehlungen umgesetzt werden. So wird während der Sommermonate, wenn Kaltluftabflüsse besonders häufig auftreten und zu Beschwerden führen, der Abfall im Süden des Deponiekörpers eingebaut. Die Geruchsfahne streicht in diesem Fall südlich am Wohngebiet vorbei. In den Wintermonaten wird der Einbau in nördliche Richtung verlagert.

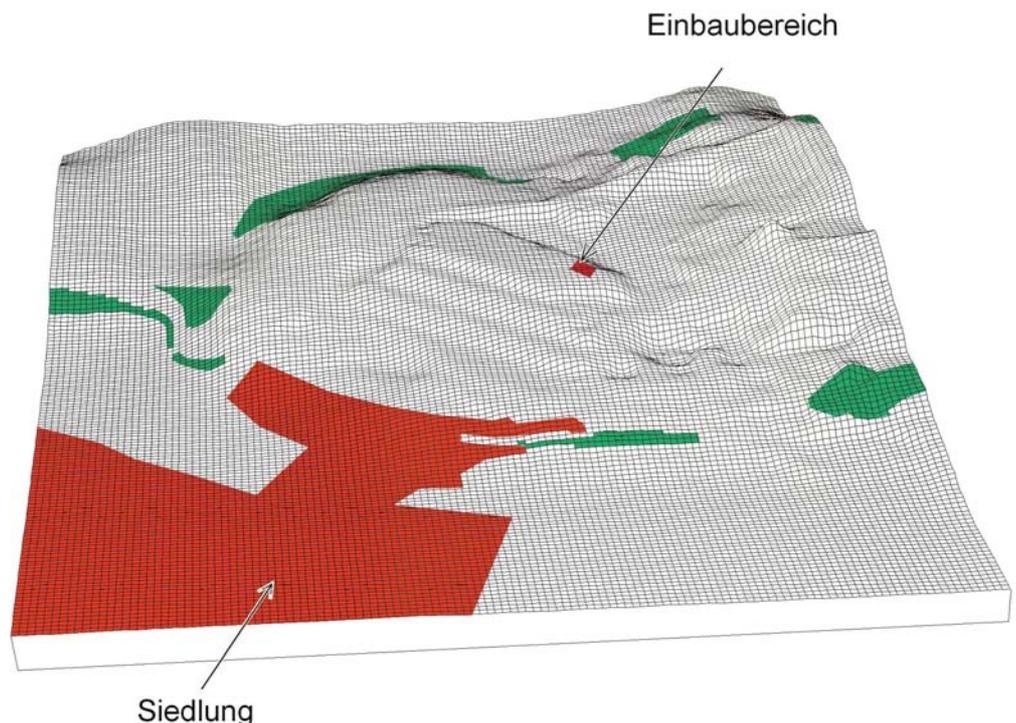


Abb. 4-7: Perspektivische Ansicht des Untersuchungsgebietes mit Einbaubereich der Deponie.

### 5.2 Direkte Methode der Immissionsermittlung: Messungen

Die messtechnische Erfassung der Geruchsstoffimmission wird dann angewandt, wenn der Geruchsemittent bereits vorhanden ist und

- sich die Immissionsituation nicht durch Simulation einer Emission berechnen lässt,
- die Ausbreitungsverhältnisse derart komplex sind, dass Ausbreitungsrechnungen zu keinen verwertbaren Ergebnissen führen und
- die Geruchsbelastung in einem Untersuchungsraum durch mehrere Emittenten geprägt ist.

Wie bei der Emissionsermittlung dürfen rechts- und planungssichere Immissionserhebungen nur durch ge-

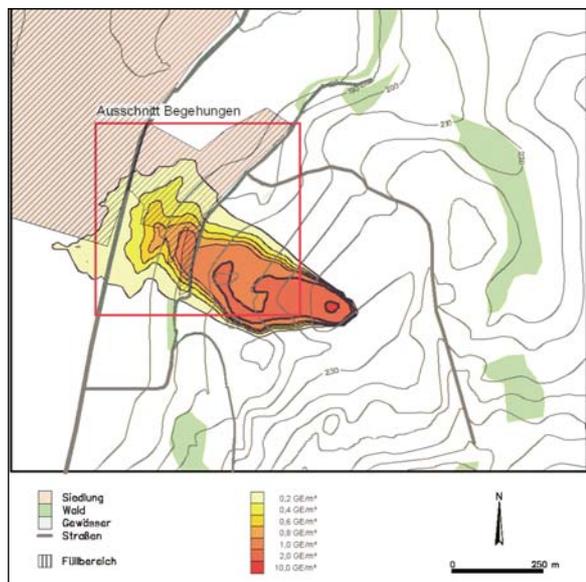
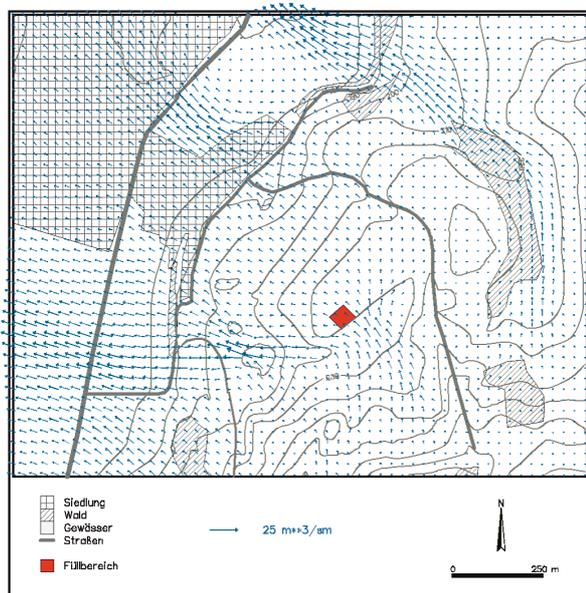


Abb. 4-8: Berechnete Kaltluftabflüsse (links) und zugehörige Geruchsstoffkonzentrationen (rechts). Der Einbaubereich ist rot gekennzeichnet.

mäß §§ 26,28 BImSchG bekannt gegebene Messstellen durchgeführt werden.

Die Bestimmung der Geruchsstoffimmissionssituation ist in der VDI Richtlinie 3940 detailliert beschrieben. Um die Geruchsstoffimmission durch Begehungen zu ermitteln, ist der Untersuchungsraum in möglichst gleich große rechteckige Beurteilungsfelder einzuteilen. Die Messpunkte befinden sich an den Ecken der Flächen. Für die Erhebung sind nur diejenigen Bereiche relevant, in denen sich mögliche Betroffene nicht nur vorübergehend aufhalten. Somit müssen Freiflächen und Waldgebiete nicht untersucht werden, es sei denn, dort wird z. B. ein Wohngebiet geplant.

Aufgrund der Anforderung aus der VDI-Richtlinie 3940, dass die Erhebung der Geruchsimmissionshäufigkeit an den Eckpunkten einer Rasterfläche zeitlich und meteorologisch unabhängig sein muss, werden vier Unterraster (vgl. Abb. 4-10, Raster A = rot, Raster B = braun, Raster C = grün und Raster D = gelb) definiert. Es ist daher ein detaillierter Messplan zu entwickeln, in dem alle Tageszeiten und alle Wochentage gleich verteilt begangen werden.

Die Geruchserhebungen werden durch Probanden durchgeführt. Diese prüfen den Geruch am Messpunkt anhand eines vorgegebenen Schlüssels für Geruchsqualitäten („Es riecht nach ...“). Alle Probanden wurden vor, während und nach Abschluss des Projektes mehrfach mit n-Butanol und H<sub>2</sub>S gemäß VDI 3940 auf Eignung getestet.

Der Qualitätsschlüssel für die zu erwartenden Geruchsimmissionen richtet sich nach der spezifischen Aufgabenstellung. Nicht im Schlüssel vereinbarte Qua-

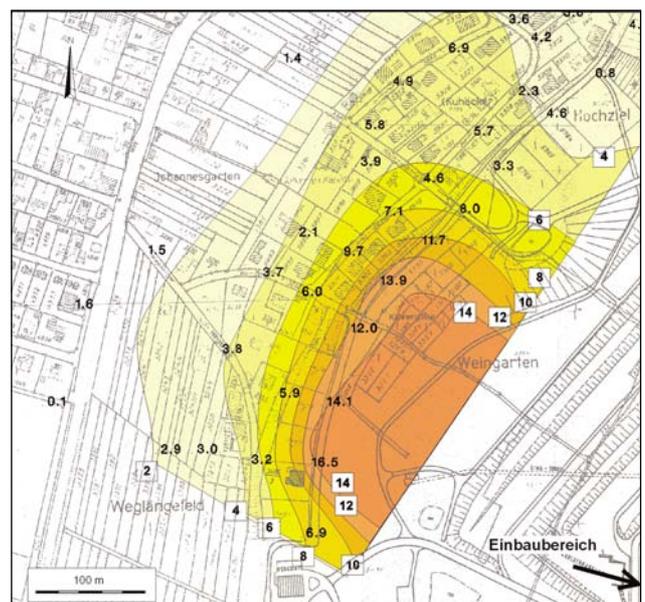


Abb. 4-9: Mittlere Zeitanteile mit deutlich wahrnehmbarem Deponiegeruch (in Prozent der Aufenthaltsdauer) im Untersuchungsgebiet.

litäten werden unter „Sonstige Gerüche“ aufgelistet. Dabei beschreiben die Probanden ihre Geruchsempfindung hinsichtlich der Qualität in Stichworten.

Der jeweilige Messzeitraum pro Punkt beträgt 10 min, wobei eine Bewertung des Geruchseindrucks alle 10 s integrierend erfolgt. Jeder Messpunkt wird innerhalb eines halben Jahres 13-mal begangen.

Werden während des Erhebungszeitraumes von 10 min mindestens 10 % der 10 s-Intervalle anlagenspezifische Gerüche (d. h. sechs Eindrücke einer bestimmten Geruchsqualität) wahrgenommen, so ist entsprechend der Geruchsimmissions-Richtlinie das Kriterium einer „Geruchsstunde“ erfüllt. Aus der Anzahl der Geruchsstunden an den Messpunkten wird die Geruchsstundenhäufigkeit je Rasterfläche, wie im Beispiel unten dargestellt, berechnet (vgl. Abb. 4-10).

Als weiteres Beispiel ist in Abb. 4-11 für ein Begehungs-raster für eine Begehung aus der Landwirtschaft und in Abb. 4-12 das Ergebnis einer Geruchsimmissions-erhebung aus einer Rasterbegehung für ein Hafengebiet, in dem 14 verschiedene Geruchsstoffqualitäten gemessen wurden, für die Geruchsstoffqualität „Küchengeruch und Lebensmittel“ dargestellt. Abweichend von der üblichen Vorgehensweise wurden die Geruchsstundenhäufigkeiten für jeden Messpunkt berechnet und in Form von Isolinien dargestellt.

Vergleichsuntersuchungen (KOST et al. 1998) zur messtechnischen Erhebung von Gerüchen im Feld haben gezeigt, dass bei konsequenter Anwendung der VDI Richtlinie 3940 reproduzierbare Ergebnisse auch von unterschiedlichen Messteams und Messinstituten erzielt werden können, auch wenn der Erhebungsumfang mit 13 Messungen pro Punkt (d. h. 52 Messergebnisse pro Rasterfläche) gering erscheinen mag.

**6 Ausblick, neuere Entwicklungen**

Seit einigen Jahren wird versucht, das Messgerät „Mensch“ durch chemisch-analytische Methoden zu ersetzen, um die Geruchsemissionen und -immissionen „objektiver“ und ggf. kontinuierlich ermitteln zu können. Man bedient sich hierzu der Methoden der Sensortechnik, sog. „elektronische Nasen“ (siehe z. B.

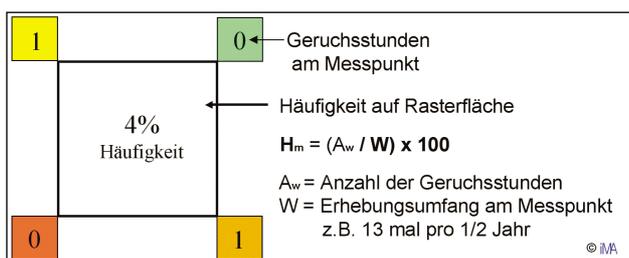


Abb. 4-10: Berechnung der Geruchsstundenhäufigkeit auf einer Rasterfläche.

DOHMANN und ARNDT 2001). Die chemischen Sensoren, die in elektronischen Nasen eingesetzt werden, besitzen keine hohe Selektivität bzgl. einzelner Substanzen, reagieren jedoch auf verschiedene Substanz-Klassen unterschiedlich. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass diese Messgeräte bisher bestenfalls emissionsseitig eingesetzt werden können, da die Geruchsstoffkonzentrationen auf der Immissionsseite zu gering sind. Ferner müssen die Sensoren auf einzelne Anlagen kalibriert werden. Insofern existiert derzeit noch keine Alternative zur Olfaktometrie.

Vielfach wird auch Kritik an den Bewertungsmaßstäben der Geruchsimmissions-Richtlinie geäußert, da die hedonische Wirkung der Gerüche (angenehm ... unan-

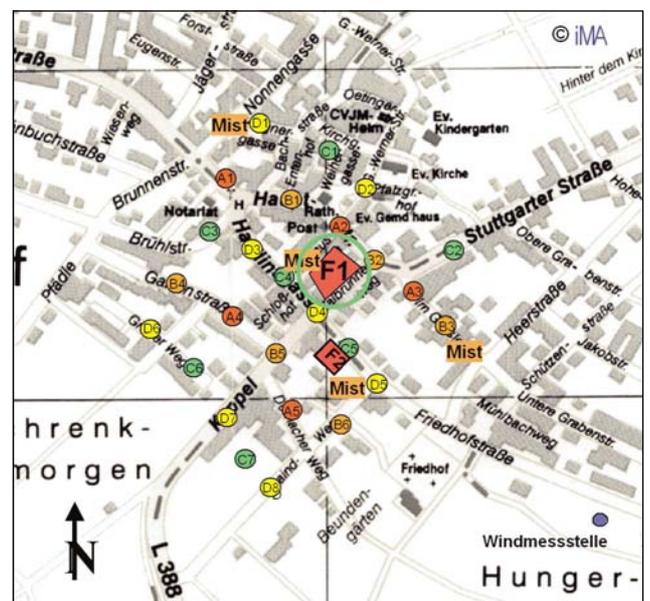


Abb. 4-11: Beispiel für eine Rasterbegehung mit der Lage der Messpunkte in einem dörflichen Untersuchungsgebiet (F1 / F2 = Bauernhof).

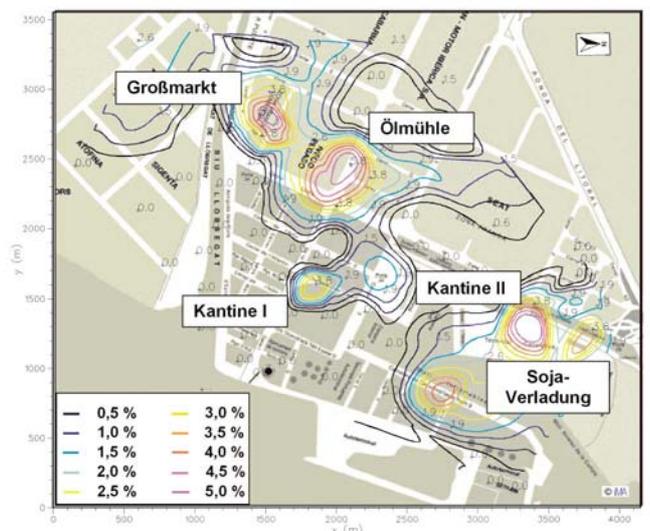


Abb. 4-12: Ergebnis der Geruchsstoffimmissionserhebung in einem Hafengebiet für die Geruchsstoffqualität „Küchengeruch und Lebensmittel“.

genehm) sowie die Geruchsintensität nur ungenügend berücksichtigt würden. Aktuell wurde zu diesem Thema ein Forschungsprojekt abgeschlossen, das vom Verband der Chemischen Industrie (VCI) und den Ländern Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg finanziert wurde. Die Ergebnisse sind bisher noch nicht veröffentlicht.

Die Behandlung des Themas Geruch ist aus der praktischen Anwendung entstanden und vereint ingenieurtechnische und meteorologische Fragestellungen. Wie man erkennt, sind noch etliche Fragen offen, da es sich um eine sehr komplexe Materie handelt. In den nicht deutschsprachigen Ländern, abgesehen von den Niederlanden, existieren bisher wenig immissionsschutzrechtliche Regelungen im Bereich Geruch, doch gewinnt das Thema auch in diesen Ländern zunehmend an Bedeutung.

### Literatur

- BOTH, R., MÜLLER, F.: Bewertung von Geruchsemissionen. VDI-Kolloquium „Gerüche in der Außenluft“, Mannheim, 13.-14.05.2003, *VDI-Wissensforum*, Graf-Recke-Straße 84, Düsseldorf, 11 S.
- DOHMANN, M., D. ARNDT, D., 2001: Geruchsmessung mittels künstlicher Nase. In: Geruchsemissionen, Tagungsband der 15. Flockungstage 2001, *Uni Karlsruhe*, ISBN 3-9807000-8-9, 17-26.
- GERUCHSIMMISSIONS-RICHTLINIE, 1999: Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen. Fassung vom 13. Mai 1998 mit Begründung und Auslegungshinweisen. Niederschrift über die 96. Sitzung des Länderausschusses für Immissionsschutz am 05.-07.05.1999. (Zu beziehen z. B. über das Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen, im Eigendruck, 1-32).
- HARTMANN, U., 2002: Validierung von Geruchsausbreitungsmodellen – Modellvergleich anhand von Geruchsimmissionsmessungen. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **62**, 425-430.
- JANICKE, L., 1999: Das Geruchsausbreitungsmodell MEPOD und seine Implementierung in IBJmepod. *Dunum. Ingenieurbüro Janicke*, <http://www.janicke.de>.
- JANICKE, L., 2001: Ausbreitungsmodell LASAT – Referenzbuch zur Version 2.10. *Dunum. Ingenieurbüro Janicke*, <http://www.janicke.de>.
- KOCH, E. 1998: Erfahrungen mit der Geruchsimmissions-Richtlinie (GIRL) in NRW in der Probephase 1995 bis 1997 – Behandlung von Auslegungsdaten. *VDI-Berichte* **1373**, 413-422.
- KOST, W.-J., F. KRUPAR, R. MITTERWALLNER, 1998: Die Bedeutung von Qualitätssicherung und Normierung für Geruchsgutachten – Eine Paralleluntersuchung. *VDI-Berichte* **1373**, 299-306.
- MEDROW, W., 1991: Ausbreitung von Geruchsstoffen in der Atmosphäre. *Meteorologische Rundschau* **44**, 37-42.
- MEDROW, W., C. JUERGENS, 1984: Die Simulation der Geruchsausbreitung. *Staub-Reinhaltung der Luft* **44**, 475-479.
- PLATTIG, K.-H., 1998: Die Physiologie des Riechens und ihre Bedeutung, insbesondere für kulturelle Bewertungsunterschiede von Gerüchen. *VDI-Berichte* **1373**, 1-18.
- RICHTER, C.-J., E. OEHLER, H. SCHRIEWER, 1998: Optimierung einer großtechnischen Kompostierungsanlage im Hinblick auf Geruchsemissionen und Verfahrenstechnik. *VDI-Berichte* **1373**, 477-488.
- DE LA RIVA, C., E. RATZKI, W. MEDROW, 1991: Zur Ausbreitung von Geruchsstoffen in der Atmosphäre – Eine „TA-Luft-konforme“ Modellierung. *VDI-Schriftenreihe* **16**, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1-12.
- RÖCKLE, R., C.-J. RICHTER, 1998: Ausbreitung von Geruchsstoffen in Kaltluftabflüssen – Messungen und Modellrechnungen. *VDI-Berichte* **1373**, 249-259.
- RÜHLING, A., A. LOHMEYER, 1998: Modellierung des Ausbreitungsverhaltens von luftfremden Stoffen/Gerüchen bei niedrigen Quellen im Nahbereich. Hrsg.: *Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie*, Radebeul, 1-15.
- SCHUMACHER, W., 2001: Rechenmodelle für die Ausbreitung von Geruchsstoffen. Fassung 04/2000. Manuskript für das *VDI Wissensforum* „Gerüche in der Außenluft“, 16./17.10.2001, Mannheim, 9 S.
- VDI-RICHTLINIE 3471, 1986: Emissionsminderung Tierhaltung: Schweine – Geruchsstoffe. Düsseldorf, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin, 1-9.
- VDI RICHTLINIE 3788, Blatt 1, 1999: Ausbreitung von Geruchsstoffen in der Atmosphäre – Grundlagen, Düsseldorf, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin, 1-28.
- VDI RICHTLINIE 3881, BLATT 1: Olfaktometrie, Geruchsschwellenbestimmung; Grundlagen, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin, 1-25.
- VDI RICHTLINIE 3881, BLATT 2: Olfaktometrie, Geruchsschwellenbestimmung; Probenahme, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin, 1-10.
- VDI RICHTLINIE 3881, BLATT 3: Olfaktometrie, Olfaktometer mit Verdünnung nach dem Gasstrahlprinzip, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin, 1-10.
- VDI RICHTLINIE 3881, BLATT 4 (Entwurf): Olfaktometrie, Geruchsschwellenbestimmung; Anwendungsvorschriften und Verfahrenskenngrößen, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin, 1-28.
- VDI-RICHTLINIE 3940: Bestimmung der Geruchsstoffimmissionen durch Begehungen. Düsseldorf, 1993 (neuer Gründruck ist in Vorbereitung), *Beuth Verlag GmbH*, Berlin, 1-31.
- WINNECKE, G., B. STEINHEIDER, 1998: Expositions-Wirkungs-Zusammenhänge für Geruchsbelästigungen und Beschwerden: Eine Übersicht. *VDI-Berichte* **1373**, 361-372.
- DIN EN 13725, 2003: Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie, Deutsche Fassung der EN 13725, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin, 1-72.

# 5 J. BAUMÜLLER, U. REUTER Umweltmeteorologie und Planung

## 1 Einleitung

Zu den Hauptanwendungsgebieten der Umweltmeteorologie gehören die Raumplanung sowie der anlagen- und produktbezogene Immissionsschutz. Weitere Anwendungen sind beispielsweise Fragen der Kontamination von Innenraumluft, Luftbelastung in Tiefgaragen, Strömungs- und Ausbreitungsfragen in Untergrundbahnen oder auch Detailspekte im Zusammenhang mit Windkraftanlagen. Der folgende Beitrag betrachtet nur die Situation in der Bundesrepublik, da infolge z. T. ganz anderer Gesetzeslage in anderen Ländern eine separate Betrachtung notwendig wäre.

Zu dem Bereich der Raumplanung gehören beispielsweise Raumordnungsverfahren mit Umweltverträglichkeitsuntersuchungen, aber auch Planfeststellungsverfahren sowie die „traditionelle“ Bauleitplanung (Flächennutzungsplan und Bebauungsplan) und die Vorhaben- und Erschließungspläne nach dem Wohnbaurichterleichterungsgesetz.

Im anlagen- und produktbezogenen Immissionsschutz geht es beispielsweise um die Errichtung und den Betrieb von Anlagen sowie um die Beschaffenheit von Anlagen bzw. bestimmten Stoffen und Erzeugnissen und um die Beschaffenheit und den Betrieb von Fahrzeugen.

Die in den vorangegangenen Kapiteln 2, 3 und 4 vorgestellten Grundlagen machen deutlich, dass heute effiziente umweltmeteorologische Methoden und Verfahren für die Berücksichtigung in den verschiedensten Anwendungen zur Verfügung stehen. Das gilt sowohl für messtechnische Anwendungen als auch für Modellberechnungen.

Dieser Beitrag konzentriert sich schwerpunktmäßig auf das Hauptanwendungsgebiet der Umweltmeteorologie, das Stadtklima. Darunter versteht man das durch Bauwerke beeinflusste Klima und die Veränderung der natürlichen Luftzusammensetzung durch anthropogene Einflüsse (HELBIG et. al. 1999). Beleuchtet wird zunächst die Frage, wo die Belange der Umweltmeteorologie rechtlich verankert sind. Weiterhin befasst sich der Beitrag mit der Frage, wie umweltmeteorologische Grundlagen bedarfsgerecht für die Anwendung in der Planung zur Verfügung stehen sollten. Ein Abschnitt widmet sich der Bewertung von Klima und Luft und ein weiterer der Umweltmeteorologie im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren. Schließlich befasst sich ein Abschnitt mit den konkreten Festsetzungsmöglichkeiten umweltmeteorologischer

Forderungen in der Raumplanung. Dieser letzte Gesichtspunkt ist sehr wesentlich für das interdisziplinäre Zusammenwirken von Umweltmeteorologen und Planern. Eine optimale Zusammenarbeit zwischen Umweltmeteorologen und ihren „Auftraggebern“ in der Anwendung ist trotz vieljähriger Anstrengungen noch nicht erzielt worden. Dem Abschnitt der konkreten Festsetzungsmöglichkeiten, d. h. der Sprache des Planers, wird daher besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass für städtebauliche Planungen im politischen Abwägungsprozess die Genauigkeit der Untersuchungen auf die letzte „Kommastelle“ nicht notwendig ist. Dies gilt beispielsweise jedoch nicht bei immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren.

## 2 Rechtliche Grundlagen

Soweit umweltmeteorologische Fragestellungen in der Raumplanung berührt sind, finden sich die wesentlichen gesetzlichen Anforderungen im BAUGESETZBUCH (1997). Gemäß § 1 (5) sollen die Bauleitpläne „eine geordnete städtebauliche Entwicklung und eine dem Wohl der Allgemeinheit entsprechende sozialgerechte Bodennutzung gewährleisten und dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern und die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln.“

Nach § 1 (5) Ziffer 7 sind dabei insbesondere zu berücksichtigen „... die Belange des Umweltschutzes, auch durch die Nutzung erneuerbarer Energien, des Naturschutzes und der Landschaftspflege, insbesondere des Naturhaushaltes, des Wassers, der Luft und des Bodens einschließlich seiner Rohstoffvorkommen, sowie das Klima.“

Die Umweltmeteorologie wird mit Luft und Klima hier explizit angesprochen.

Das Baugesetzbuch bietet zusätzlich mit einem gesetzlichen Katalog zulässiger Festsetzungen in Bebauungsplänen (s. Abschnitt 7) differenzierte Möglichkeiten für eine stadtklimagerechte Stadtplanung.

Auch das Gesetz über die UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG (2001) tangiert die Umweltmeteorologie. Zweck dieses Gesetzes ist gemäß § 1 sicherzustellen, dass bei bestimmten Vorhaben zur wirksamen Umweltvorsorge nach einheitlichen Grundsätzen die Auswirkungen auf die Umwelt ermittelt, beschrieben und bewertet werden.

Schließlich findet sich auch im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 2002) mit § 50 ein Grundsatz, der jede planende Institution bindet: „Bei raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen sind die für eine bestimmte Nutzung vorgesehenen Flächen einander so zuzuordnen, dass schädliche Umwelteinwirkungen auf die ausschließlich oder überwiegend dem Wohnen dienenden Gebiete sowie auf sonstige schutzbedürftige Gebiete soweit wie möglich vermieden werden.“

Das zuletzt genannte Bundes-Immissionsschutzgesetz bildet auch eine wesentliche rechtliche Grundlage für umweltmeteorologische Belange im Zusammenhang mit dem anlagen- bzw. produktbezogenen Umweltschutz.

So sind umweltmeteorologische Messungen und Modellberechnungen – z. B. Ausbreitungsrechnungen – notwendig im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen (TA-Luft 2002). Auch der vierte Teil des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Beschaffenheit und Betrieb von Fahrzeugen, Bau und Änderung von Straßen- und Schienenwegen) enthält Regelungen, deren Beachtung umweltmeteorologischer Untersuchungen bedarf. Dazu zählt der § 40 über Verkehrsbeschränkungen bzw. verkehrslenkende Maßnahmen bei Überschreiten bestimmter Schadstoffprüfwerte. Sowohl Messungen von Luftschadstoffkomponenten als auch Untersuchungen zur Schadstoffausbreitung sind hier erforderliche Anwendungen.

Schließlich findet ein breites Spektrum umweltmeteorologischer Untersuchungsmethoden Anwendung im Zusammenhang mit den Regelungen im Bundes-Immissionsschutzgesetz, die sich auf die Überwachung der Luftverunreinigung im Bundesgebiet und auf Luftreinhaltepläne beziehen (§ 44 bis § 47).

Je nach notwendiger Anwendung eignen sich zur Sicherstellung der beschriebenen rechtlichen Anforderungen entweder umweltmeteorologische Messungen oder – insbesondere auch für Prognosen künftiger Zustände – Modellberechnungen bzw. Laboruntersuchungen (z. B. im Windkanal) auf der Basis der in den Kapiteln 2 bis 4 beschriebenen Bandbreite umweltmeteorologischer Grundlagen.

Die für eine Fragestellung erforderliche Qualität von Untersuchungen ist in den einzelnen Gesetzen in der Regel nicht festgelegt. Hierzu dienen Verwaltungsvorschriften (z. B. TA Luft) bzw. Rechtsverordnungen und Normen sowie Richtlinien.

### **3 Umweltmeteorologie im anlagenbezogenen Umweltschutz**

Der anlagenbezogene Umweltschutz wird geregelt durch die 1. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (TA Luft 2002). Die Vorschriften dieser Technischen Anleitung sind u. a. zu

beachten bei der Prüfung von Anträgen auf Erteilung einer Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb einer neuen Anlage sowie zur Änderung einer bestehenden Anlage. In diesem Zusammenhang sind sowohl umweltmeteorologische Messungen als auch Berechnungen von Bedeutung.

Gemäß Kapitel 4.6 der TA Luft sind Messungen der Schadstoffvorbelastung nach bestimmter Vorgehensweise durchzuführen. Dabei sind Regelungen getroffen bezüglich der Messplanung, Messhöhe, dem Messzeitraum, den Messpunkten und Messverfahren sowie der Messhäufigkeit.

Die Schadstoffzusatzbelastung durch die jeweilige Anlage ist durch rechnerische Immissionsprognose zu ermitteln. Dabei ist das Berechnungsverfahren in Anlage 3 der TA Luft geregelt. Kern der Berechnung ist das Partikelmodell der VDI-Richtlinie 3945, Blatt 3 (2000) mit zusätzlicher Berücksichtigung weiterer VDI-Richtlinien.

## **4 Hilfsmittel für die Planung**

Für die Planung ist es erforderlich, möglichst zeitnah Aussagen über den Ist-Zustand, aber auch über die Veränderung des Klimas und der lufthygienischen Situation durch die Planung zu erhalten. Während für den Ist-Zustand sowohl lokale Messungen als auch Modellberechnungen in Betracht kommen, sind für zukünftige Planzustände nur Berechnungsverfahren bzw. Modelluntersuchungen im Windkanal geeignet.

Bezüglich einiger Gesetze und Verordnungen besteht die Notwendigkeit von Messungen. Dazu gehören der gebietsbezogene Immissionsschutz (BImSchG), die Anforderungen der TA Luft, die 22. BImSchV (2002) und 23. BImSchV (1996) und die Beweissicherung bei Rechtsverfahren.

Mit den zur Verfügung stehenden Messmethoden und Berechnungsverfahren befassen sich die Kapitel 2, 3 und 4 dieses Heftes. Im Kapitel 2 werden auch Vor- und Nachteile beider Vorgehensweisen diskutiert (Kap. 2, Abschnitt 4.1).

## **5 Anwendungsgerechte Grundlagen**

Um relativ rasch Aussagen zur klimatischen und lufthygienischen Situation insbesondere im Zusammenhang mit Planungen machen zu können, ist es erforderlich, auf ausgearbeitete Grundlagen zurückgreifen zu können, da oft nicht die Zeit gegeben ist, spezielle Untersuchungen durchzuführen. Dies hat z. B. dazu geführt, dass für größere Städte und Regionen Stadtklimauntersuchungen durchgeführt wurden (Stadtklima Bayern 1986, MÜLLER 1997, Landeshauptstadt Dresden 1998), die zum Teil auch in der Form von Klimaatlantanten (BAUMÜLLER et al. 1992, Umweltatlas Berlin 1985, 1995) Stadtklimainformationssystemen (Landes-

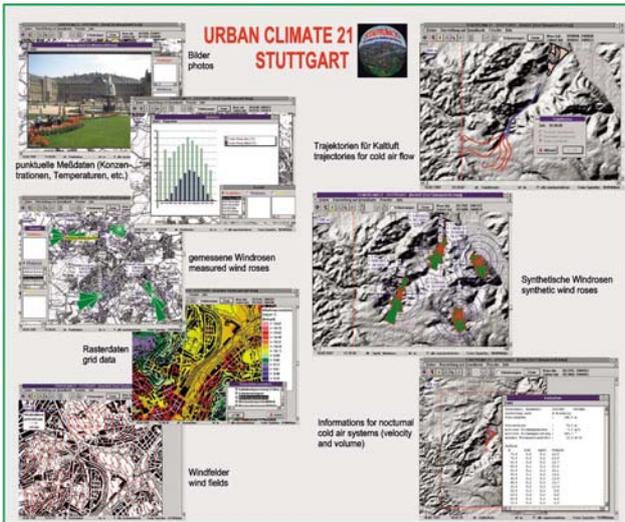


Abb. 5-1: Stadtklima 21 – Grundlagen zum Stadtklima und zur Planung. „Stuttgart21“, CD-ROM, (Landeshauptstadt Stuttgart 2000).

hauptstadt Stuttgart 2000) (Abb. 5-1) und Karten mit Grundlagen und Hinweisen für die Planung (Kommunalverband Ruhrgebiet, 1992, 2002, KABA 1998) (Abb. 5-2) umgesetzt wurden. Auf der Basis solcher Unterlagen ist es möglich, zeitnah gutachterliche Stellungnahmen zu Planungen abzugeben. Dies betrifft die Planungsebene der vorbereitenden Bauleitplanung (Flächennutzungsplan) als auch die der rechtsverbindlichen Bauleitplanung (Bebauungsplan). Je detaillierter die Planung ist, umso mehr ist es erforderlich, bei Bedarf kleinskalige Detailuntersuchungen durchzuführen, wie z. B. die Berechnung der heutigen und zukünftigen Schadstoffbelastungen in Straßenräumen (z. B. BÄCHLIN et al. 2000) (Abb. 5-3) bzw. die mikroskalige Berechnung der thermische Situation (z. B. BLAZEK et al. 1998) (Abb. 5-4). Es liegt nahe, dass nicht jedes Messkonzept, jedes Rechenmodell in gleicher Weise für jede Planungsfrage geeignet ist. Vielmehr entscheidet die Planungsebene über die der Fragestellung angemessenen Untersuchungsmethoden. Die Genauigkeit der verwendeten Grundlagen muss

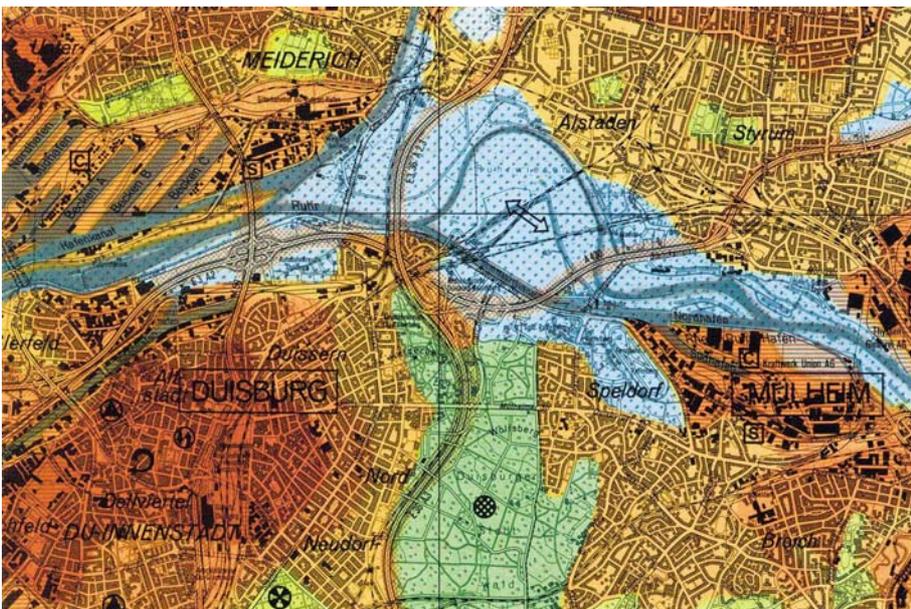


Abb. 5-2: Ausschnitt aus der Synthetischen Klimafunktionskarte Ruhrgebiet (KVR 1992).

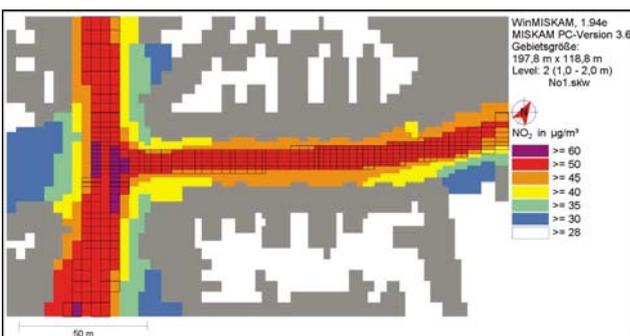


Abb. 5- 3: NO<sub>2</sub>-Gesamtbelastung (Jahresmittel), Podbielskistraße in Hannover (BÄCHLIN et al. 2000).

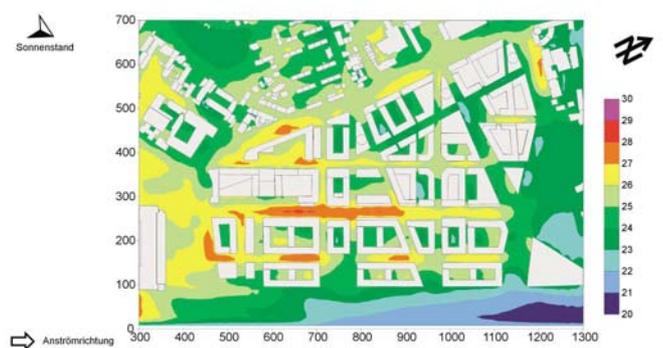


Abb. 5- 4: Stuttgart 21 Plangebiet A, Planzustand 2010 Lufttemperatur in Grad C, 1,5 m über Grund (Tag). (BLAZEK et al. 1998).

sich entsprechend in der Formulierung der Aussagen zur klimatisch-lufthygienischen Situation niederschlagen.

Es ist vor allen Dingen wichtig, die Ergebnisse von Untersuchungen so aufzubereiten, dass sie direkt zur Beantwortung planungsrelevanter Fragen verwendet werden können. So hilft einem Planer alleine der Hinweis, dass durch die Planung die Lufttemperatur um 0,7 K erhöht wird, nicht weiter. Vielmehr geht es um Hinweise, wie Planungen stadtklimagerecht verändert werden können. Diese Hinweise müssen die Sprache und Festsetzungsmöglichkeiten der Planer enthalten (BAUMÜLLER et. al. 1998) (vgl. Abschnitt 7).

Bei der Erarbeitung von Grundlagen ist das Vorhandensein von Richtlinien sehr hilfreich. In diesem Zusammenhang wurden in den letzten Jahren verschiedene VDI-Richtlinien erarbeitet, z. B. VDI 3783 mit Blättern zur „Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre“, VDI 3786 mit Blättern zu „Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung“ und VDI 3787 mit Blättern zu „Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen“ sowie zu „Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt und Regionalplanung“.

In welchem Umfang und mit welchen Methoden Fragestellungen zu behandeln sind, ist derzeit nicht festgelegt. Die eingesetzten Untersuchungsmethoden sollten standardisiert sein und müssen dem aktuellen wissenschaftlich-technischen Stand entsprechen. Da bisher derartige Qualitätsnormen fehlen, ist die Erstellung eines entsprechenden Regelwerkes anzustreben.

### 6 Bewertung

Umweltmeteorologische Ergebnisse müssen für die Anwendung bewertet werden. Bei Fehlen absoluter Bewertungsmaßstäbe bieten sich relative Bewertun-

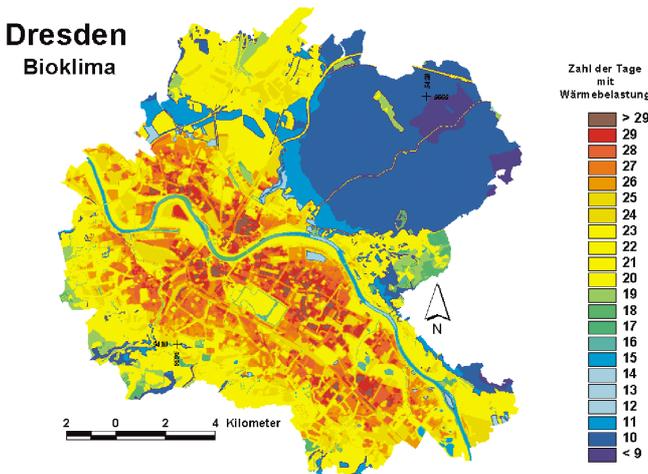


Abb. 5-5: Bioklimakarte von Dresden (Zahl der Tage mit thermischer Belastung, PMV >2,5), (Landeshauptstadt Dresden 1998).

gen an. So können z. B. die Auswirkungen mehrerer Planungsvarianten untereinander verglichen werden. Absolute Bewertungskriterien fehlen insbesondere im Bereich des Klimas. Dies führt dazu, dass klimatische Gesichtspunkte oftmals nicht in Planungen einfließen. Eine klimatische Optimierung von Planungen ohne Grenzwerte wird von den politischen Entscheidungsträgern gegenüber anderen Belangen wenig Beachtung finden. Mit der VDI-Richtlinie 3787-2 (1998) gibt es ein Bewertungsverfahren für die thermische Komponente des Bioklimas, wengleich auch hier keine absoluten Grenzwerte vorgeschlagen werden. Diese Bewertung berücksichtigt mit Modellrechnungen alle den Wärmehaushalt eines Menschen beeinflussenden meteorologischen Parameter.

Die Bewertung des thermischen Wirkungskomplexes basiert vielfach auf der Behaglichkeitsgleichung nach Fanger. Sie führt zur Berechnung eines skalierten Wertes für das thermische Empfinden (Predicted Mean Vote – PMV) und gibt an, welche Einschätzung das thermische Milieu im Mittel durch ein großes Kollektiv von Personen erfährt (vgl. Tab. 5-1). In der Abb. 5-5 ist die bioklimatische Belastung für Dresden als Karte der Anzahl von Tagen mit Wärmebelastung (PMV > 2,5) dargestellt (Landeshauptstadt Dresden 1998).

PMV	Thermisches Empfinden	physiologische Belastungsstufe
-3,5	Sehr kalt	Extremer Kältestress
-2,5	Kalt	Starker Kältestress
-1,5	Kühl	Mäßiger Kältestress
-0,5	Leicht kühl	Schwacher Kältestress
0,5	Behaglich	Keine Wärmebelastung
1,5	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
2,5	Warm	Mäßige Wärmebelastung
3,5	Heiß	Starke Wärmebelastung
	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Tab. 5-1: Bewertungsindizes PMV zu Stufen thermischen Empfindens und physiologischen Belastungsstufen (VDI 7387-2 1998).

Böenwindgeschwindigkeit	Überschreitungs-Häufigkeit	Einschränkungen der Nutzungsmöglichkeit	Nutzungs-Kategorie
6 m/s	max. 1 %	keine Einschränkung, Windkomfort	1
6 m/s 8 m/s	max. 5 % max. 1 %	zulässig in Warte- und Sitzbereichen (z.B. Spielplätze, Straßencafés...)	2
6 m/s 10 m/s 15 m/s	max. 20 % max. 1 % max. 0,05 %	zulässig auf Flächen für kurzzeitigen Aufenthalt	3
13 m/s	max. 1 %	zulässig für problemloses Laufen (z.B. an Gebäudeecken)	4
18 m/s 20 m/s	max. 1 % max. 0,05 %	problematisches Laufen, Windschutz empfehlenswert	5
18 m/s	> 1 %	Gefahr für Fußgänger, Windschutz erforderlich	6

Tab. 5-2: Kriterien zur Beurteilung der Windverhältnisse (LOHMEYER et al. 1992).

Bezüglich des Windkomforts gibt es Ansätze für eine absolute Bewertung (LOHMEYER et al. 1992). Die Tab. 5-2 zeigt einige Kriterien im zusammenfassenden Überblick. Als Bezugsgeschwindigkeit wurde die Böengeschwindigkeit herangezogen. Teilweise existieren mehrere Kriterien zur Beurteilung des Windkomforts. In diesen Fällen genügt bereits das Nichterfüllen einer Bedingung, um der nächst höheren, also kritischeren Nutzungskategorie zugeordnet zu werden.

Zur Bewertung der lufthygienischen Situation existieren zahlreiche Grenzwerte. Sie sind für einzelne Schadstoffkomponenten und unterschiedliche Einwirkungsdauer in der Tab. 5-3 zusammengestellt.

Die in der TA Luft (2002) genannten Immissionsgrenzwerte dienen der lufthygienischen Beurteilung genehmigungsbedürftiger Anlagen. So ist der Nachweis über die Einhaltung der TA Luft Werte eine notwendige Voraussetzung für die Genehmigungsfähigkeit einer Anlage. Diese Grenzwerte sind identisch mit den Grenzwerten der 22. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. Die in dieser Verordnung umgesetzten EU einheitlichen lufthygienischen Kriterien haben das Ziel, für die dauerhafte Verbesserung der Luftqualität in der Gemeinschaft zu sorgen. Für Ozon sind EU weite Zielwerte festgelegt.

Die Festlegung „Maximaler Immissionswerte“ (MI-Werte) durch die VDI-Kommission Reinhaltung der Luft (VDI, 2310) zielt darauf ab, eine Gesundheitsschädigung des Menschen, insbesondere auch von Kindern, Alten und Kranken, selbst bei langfristiger Einwirkung zu vermeiden und Tiere, Pflanzen und Sachgüter vor Schädigung zu schützen.

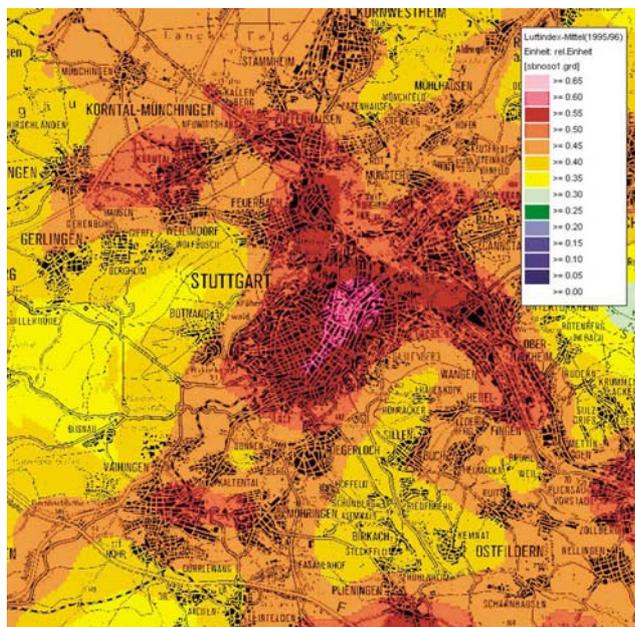


Abb. 5-6: Mittlerer jährlicher Luftbelastungsindex (1995/96) in Stuttgart.

Schadstoff	Immissionswerte TA Luft	MIK-Werte VDI-2310	Leitwerte WHO	Grenzwerte <sup>h</sup> 22. BImSchV	Zielwerte EU	Konzentrationswerte § 40 (2) BImSchG	Richtwerte Dt. Bäderverb.
SO <sub>2</sub>	I <sub>1</sub>	50	—	50	—	—	—
	I <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—
	24 h	125 <sup>m</sup>	300	125	125 <sup>m</sup>	—	—
	1 h	350 <sup>l</sup>	—	—	350 <sup>l</sup>	—	—
	— h	—	1000	—	—	—	—
NO <sub>2</sub>	I <sub>1</sub>	40	—	—	40	—	15-34 <sup>p</sup>
	I <sub>2</sub>	—	—	—	—	160	30-50 <sup>p</sup>
	24h	—	100	150	—	—	—
	1 h	200 <sup>c</sup>	—	400	200 <sup>c</sup>	—	—
	— h	—	200	—	—	—	320 <sup>o</sup>
O <sub>3</sub>	8 h	110	—	—	110	120 <sup>o</sup>	—
	1 h	180/360 <sup>b</sup>	—	150-200	180/360 <sup>b</sup>	180/240 <sup>e</sup>	—
	— h	—	120	—	—	—	—
SST	I <sub>1</sub>	40	75	—	40 <sup>n</sup>	—	15-27 <sup>q</sup>
	I <sub>2</sub>	—	—	—	—	8 Ruß	30-48 <sup>q</sup>
	24 h	50 <sup>j</sup>	150/250 <sup>g</sup>	120 <sup>j</sup>	50 <sup>j</sup>	—	—
	1 h	—	500	—	—	—	—
CO	I <sub>1</sub>	—	10000	—	—	—	—
	I <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—
	24 h	—	10000	—	—	—	—
	8 h	10000	—	—	10000	—	—
	— h	—	50000	60000	—	—	—
Benzol I <sub>1</sub>	5	—	—	5	—	10	4-5

Tab. 5-3: Grenz- Richt- und Beurteilungswerte für Luftschadstoffe (µg/m<sup>3</sup>).

- I<sub>1</sub>: arithmetischer Jahresmittelwert
- I<sub>2</sub>: 98 % Wert bei Messdauer 1 Jahr
  - a abhängig vom Schwebstaubgehalt
  - b je nach Ortsbereich; I<sub>2</sub>-Werte als 14-Tage Mittelwerte
  - c 18 zugelassene Überschreitungen pro Jahr
  - d Kriterium gilt nur für 2 aufeinanderfolgende Werte
  - e an aufeinanderfolgenden Tagen bzw. einmalige Exposition
  - f in Gegenwart von mindestens 125 µg/m<sup>2</sup> SO<sub>2</sub>
  - g PM10-Staub je nach Ortsbereich; I<sub>2</sub>-Werte als 14-Tage Mittelwerte
  - h z. T. sind in Übergangsfristen höhere Toleranzmargen zulässig  
zusätzlich gibt es z. T. noch Alarmwerte
  - i 35 zugelassene Überschreitungen pro Jahr
  - k 180: Schwellenwert für Unterrichtung der Bevölkerung  
360 (bzw. 240): Schwellenwert für Auslösung des Alarmsystems
  - l 24 zugelassene Überschreitungen pro Jahr
  - m 3 zugelassene Überschreitungen pro Jahr
  - n Feinstäube
  - o höchstens 25 Tage pro Jahr mit Überschreitung

Die Prüfwerte der 23. Bundes-Immissionsschutzverordnung (1996) ermöglichen es den Straßenverkehrsbehörden, bei Überschreitung verkehrslenkende bzw. verkehrsbeschränkende Maßnahmen durchzuführen. In Kürze ist allerdings damit zu rechnen, dass diese Verordnung außer Kraft gesetzt wird.

Darüber hinaus gibt es noch Leitwerte der Weltgesundheitsorganisation (WHO 1987) sowie Richtwerte des Deutschen Tourismusverbandes und Deutschen

Heilbäderverbandes (1998) für die Prädikatisierung von Kurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen.

In Ergänzung zur Bewertung und Darstellung einzelner Schadstoffkomponenten besteht oft der Bedarf, auch als Grundlage für Planungen, diese Aussagen durch eine summarische Betrachtung zu ergänzen (BAUMÜLLER und REUTER 1995), wobei derzeit die methodischen Grundlagen nochmals diskutiert werden (MAYER et. al. 2002). Beispiele für die aktuelle Darstellung von Luftbelastungsindices finden sich u. a. in der Zeitschrift „VDI-Nachrichten“ zur wöchentlichen Luftbewertung, aber auch im Internet beim Projekt EURAD (<http://db.eurad.uni-koeln.de/index.html?prognose/aqi.html>). Die Abb. 5-6 zeigt exemplarisch die summarische Luftbelastung in Stuttgart, berechnet auf der Grundlage der Schadstoffe SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO und Staub.

## 7 Planungsrechtliche Festsetzungsmöglichkeiten

Bei einer stadtklimagerechten Bauleitplanung gilt es, Kenntnisse über die Wirkungszusammenhänge in der Planungspraxis konsequent umzusetzen. Dies kann mit Beschränkung auf den jeweiligen örtlichen Geltungsbereich nur mit den im Baugesetzbuch vorgesehenen Rechtsinstrumenten erfolgen, speziell mit den Darstellungen im Flächennutzungsplan, den rechtsverbindlichen Festsetzungen des Bebauungsplanes, im Vorhaben- und Erschließungsplan sowie durch Vereinbarungen in einem „Städtebaulichen Vertrag“. Neben dem Baugesetzbuch direkt sind Festsetzungen auch gemäß der Baunutzungsverordnung (BauNVO 1990) und gemäß Landesbauordnungen möglich.

Da es keine bestimmte Festsetzung gibt, die für sich alleine die Sicherung eines dem Wohlbefinden des Menschen förderlichen Stadtklimas bewirken könnte, kommt es darauf an, dass die Summe der Darstellungen und Festsetzungen im Gesamtergebnis den klimatischen Erfordernissen Rechnung trägt. Dabei ist jedoch der in § 9 (1) BauGB ausgesprochene Grundsatz zu beachten, dass alle Festsetzungen städtebaulich begründet sein müssen.

Mit Blick auf den planerischen Handlungsbedarf sollten folgende Ziele klimagerechter Planung verfolgt werden:

- Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen bzgl. des Behaglichkeitsklimas / Bioklimas,
- Verbesserung der Siedlungsdurchlüftung,
- Förderung der Frischluftzufuhr durch lokale Windsysteme,
- Verminderung der Freisetzung von Luftschadstoffen und Treibhausgasen,
- Ermittlung und sachgerechte Bewertung vorhandener oder zu erwartender Belastungen,
- Sachgerechte Reaktion auf Belastungssituationen durch Anpassung von Nutzungskonzepten.

Da die Ausbildung des Stadtklimas überwiegend auf der Umwandlung von Vegetationsflächen zu bebauten Flächen beruht, liegt bei städtebaulichen Maßnahmen ein Schwerpunkt klimagerechter Stadtplanung in einer Minimierung versiegelter Flächen sowie in der Schaffung eines hohen Grünflächenanteiles.

### 7.1 Erhaltung und Gewinnung von Vegetationsflächen

Zur Verwirklichung der Ziele von Naturschutz und Landschaftspflege dienen im Rahmen der Bauleitplanung Landschaftspläne und Grünordnungspläne. Die im Landschaftsplan enthaltenen Elemente werden in den Flächennutzungsplan eingearbeitet. Darstellungen im Landschaftsplan oder im Grünordnungsplan werden, soweit erforderlich und geeignet, in die Bebauungspläne aufgenommen und durch entsprechende Festsetzungen rechtsverbindlich.

Dafür kommen die folgenden Festsetzungsmöglichkeiten nach § 9 (1) BauGB in Betracht:

- Nr. 10 Flächen, die von Bebauung freizuhalten sind und ihre Nutzung,
- Nr. 15 öffentliche und private Grünflächen, wie Parkanlagen, Dauerkleingärten, Sport-, Spiel-, Zelt- und Badeplätze sowie Friedhöfe,
- Nr. 18 (a) die Flächen für Landwirtschaft und (b) Wald,
- Nr. 20 die Flächen oder Maßnahmen zum Schutz, zur Pflege und zur Entwicklung von Boden, Natur und Landschaft,
- Nr. 25 (a) das Anpflanzen von Bäumen, Sträuchern und sonstiger Bepflanzungen  
(b) Bindungen für Bepflanzungen und für die Erhaltung von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen sowie von Gewässern.

Zur Vermeidung von Bodenversiegelungen kommen die oben genannten Festsetzungsmöglichkeiten infrage, für deren Zulässigkeit die städtebauliche Erforderlichkeit in Bezug auf die Erfüllung der Durchgrünungsfunktion maßgebend ist. Durch Festsetzung der Mindestmaße von Baugrundstücken gemäß § 9 (1) 3. BauGB kann unerwünschter baulicher Verdichtung und damit der Bodenversiegelung entgegengewirkt werden.

Im Bebauungsplan kann auch festgesetzt werden, dass Stellplätze und Garagen außerhalb der überbaubaren Grundstücksflächen nur unter der Geländeoberfläche hergestellt (§ 9 (1) 4 BauGB i. V. m. § 12 (4) BauNVO) oder dass sie auf den nicht überbaubaren Grundstücksflächen nicht hergestellt werden dürfen (§ 23 (5) BauNVO).

Außer durch größere und kleinere Grünflächen im Stadtgebiet lassen sich durch Dachbegrünungen stadtklimatische Defizite in Bezug auf den Feuchtehaushalt und das thermische Milieu mindern.

Dachbegrünungen können im Bebauungsplan rechtsverbindlich festgesetzt werden. Dabei beruht die Dachform (Flachdach) auf § 9 (4) BauGB und die Begrünung auf § 9 (1) 25 BauGB, der die Gemeinde u. a. zur Festsetzung von Bepflanzungen für Teile baulicher Anlagen ermächtigt.

Wie jede andere Festsetzung darf auch diese nur nach geheimer Abwägung aller berührten Belange getroffen werden (§ 1 (6) BauGB). Zu bedenken sind z. B. das Brandverhalten, der Feuchtigkeits- und Korrosionsschutz sowie die Kosten der Bepflanzung einschließlich eventuell höherer Baukosten wegen der zusätzlichen Dachlasten. In der Begründung zum Bebauungsplan ist darauf einzugehen.

Auch die Begrünung von Fassaden kann aus klimatischen Gründen erfolgen. Fassadenbegrünungen können in Bebauungsplänen ebenso wie die Dachbegrünungen unter den gleichen Voraussetzungen rechtsverbindlich festgesetzt werden.

## 7.2 Sicherung des lokalen Luftaustauschs

Zur Sicherung von Kaltluftentstehungsflächen kommen grundsätzlich die im Abschnitt 7.1 genannten Darstellungs- und Festsetzungsmöglichkeiten in Betracht. Die Festsetzung von Flächen, die von der Bebauung freizuhalten sind, kann in der Regel nur innerhalb der Baugebiete aus städtebaulichen Gründen erfolgen. Dazu gehören neben der Gestaltung des Orts- und Landschaftsbildes unter anderem auch die Sicherung der Aussicht in Hanglagen sowie die Erfordernisse einer guten Durchlüftung. Die auf diesen Flächen konkret festzusetzende Nutzung richtet sich nach dem jeweiligen städtebaulichen Zweck.

Die Freihaltung von lufthygienisch möglichst unbelasteten Frischluftbahnen ist durch entsprechende Nutzungsdarstellungen und Festsetzungen in den Bauleitplänen sicherzustellen (z. B. als Grünfläche, Sport und Spielanlagen oder als Fläche für die Landwirtschaft). Auch die Festsetzung der Mindestgröße von Baugrundstücken (§ 9 (1) 3. BauGB) kann die Durchlüftungsmöglichkeit eines Gebietes fördern. Im Erläuterungsbericht zum Flächennutzungsplan (§ 5 (5) BauGB) bzw. in der Begründung zum Bebauungsplan (§ 9 (8) BauGB) ist auf die lokalklimatische Bedeutung der betreffenden Flächen für die Frischluftversorgung des Siedlungsraumes besonders einzugehen.

Die Realisierung einer im Sinne des Stadtklimas sinnvollen Zuordnung von bebauten und unbebauten (Grün-) Flächen bedarf eines darauf abgestimmten Ineinandergreifens von Landschaftsplan / Flächennutzungsplan und Grünordnungsplan / Bebauungsplan. Klima- und Lufthygienekarten stellen dabei – wie im Abschnitt 5 dargestellt – eine unverzichtbare fachliche Grundlage dar.

Stadtklimatisch günstige Siedlungs- und Bauungsformen lassen sich durch geeignete Gliederungen der

Siedlungskörper, durch Art und Weise von Hangbebauung und Aufmerksamkeit bei der Hochhausbebauung sicherstellen.

Dazu sollen Bebauungspläne, insbesondere in Bereichen, die für die Durchlüftung der Stadt von Bedeutung sind, umfassende Festsetzungen enthalten. Die Bebauungspläne sollen, soweit sie Baugebiete festsetzen, in jedem Falle die Anforderungen des § 30 (1) BauGB erfüllen. Das Maß der baulichen Nutzung ist durch die **Grundflächenzahl (GRZ)** und die **Höhe der baulichen Anlagen (HbA)** festzusetzen (§ 16 (3) BauNVO). Die überbaubaren Grundstücksflächen sind eng auszuweisen. Größere Wahlmöglichkeiten für die Anordnung der Gebäude beim Vollzug des Bebauungsplanes durch die Ausweisung großer überbaubarer Grundstücksflächen, die mit entsprechender Festsetzung der Baugrenzen im wesentlichen die ganzen Baugrundstücke überbaubar machen, können in den klimatisch kritischen Zonen nicht eingeräumt werden. Auch Festsetzungen über die Stellung der baulichen Anlagen sowie über die – meist offene – Bauweise (§ 9 (1) 2. BauGB) werden regelmäßig erforderlich sein. Um eine bestimmte Auflockerung der Bebauung sicherzustellen, kann u. a. die Mindestgröße der Baugrundstücke festgesetzt werden (§ 9 (1) 3. BauGB).

Diese planungsrechtlichen Werkzeuge lassen sich auch im Interesse einer energiesparenden kompakten Bauweise mit optimierten Abstandsverhältnissen, Gebäudeanordnungen und -ausrichtungen einsetzen.

Größere Flächen, die nach Lage, Bodenqualität und Umfang für eine landwirtschaftliche Nutzung geeignet sind und von der Bebauung ganz freigehalten werden sollen, können als Flächen für die Landwirtschaft festgesetzt werden (§ 9 (1) 18.(a) BauGB). Sind sie hierfür nicht geeignet, eine Freihaltung aber gleichwohl erforderlich, kommt eine Festsetzung als Grünfläche (§ 9 (1) 15. BauGB) oder als von Bebauung freizuhalten Fläche (§ 9 (1) 10. BauGB) in Betracht.

Auf den Baugrundstücken können auch die Stellplätze und Garagen sowie ihre Einfahrten konkret festgesetzt werden (§ 9 (1) 4. BauGB). Gegebenenfalls kann für Stellplätze und Garagen eine Festsetzung als Gemeinschaftsanlage (§ 9 (1) 22. BauGB) getroffen werden. Für Baugebiete oder Teile von Baugebieten, für die Gemeinschaftsstellplätze oder Gemeinschaftsgaragen festgesetzt werden, ist die Zulassung von Stellplätzen und Garagen auf den Baugrundstücken auszuschließen (§ 12 (6) BauNVO). Soweit erforderlich, sind (sowohl im Bauland wie auf Verkehrsflächen, Grünflächen usw.) Anpflanzungen und Pflanzbindungen festzusetzen (§ 9 (1) 25 BauGB).

Eine stringente Anwendung der im Baugesetz vorhandenen Möglichkeiten sollte künftig verstärkt zur Regel werden.

### 7.3 Maßnahmen zur Luftreinhaltung

Aufgrund des im Bundes-Immissionsschutzgesetz verankerten Verursacherprinzips steht die einzelne emittierende Anlage im Mittelpunkt der Maßnahmen zur Luftreinhaltung. Deren wesentlichstes Element ist das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren. Die Gebietsverträglichkeit einer emittierenden Anlage ergibt sich allein aus der baurechtlichen Zulässigkeit des Vorhabens gemäß der Baunutzungsverordnung und den entsprechenden Festsetzungen des Bebauungsplanes.

Besonders hinzuweisen ist auf die mit § 1 (4) BauNVO vorgesehene Möglichkeit, ein Baugebiet nach der Art zulässiger Nutzungen sowie nach der Art der Betriebe und Anlagen und deren besonderen Bedürfnissen und Eigenschaften zu gliedern. Diese Gliederungsmöglichkeit kann zur Verhinderung der Ansiedlung luftverunreinigender Betriebe in besonderen Situationen (z. B. in stadtklimawirksamen Luftaustauschbahnen oder Übergangsbereiche zu anderen Nutzungen) sogar in einem Industriegebiet herangezogen werden. Dabei entspricht es anerkannten städtebaulichen Planungsgrundsätzen, dass bei der Planung von Neubaugebieten grundsätzlich keine neuen Problemsituationen geschaffen werden sollen.

Der § 9 (1) 23. BauGB bietet eine bebauungsplanmäßige Festsetzungsmöglichkeit zur direkten Emissionsminderung; Danach können im Bebauungsplan Gebiete festgesetzt werden, in denen zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes bestimmte luftverunreinigende Stoffe nicht oder nur beschränkt verwendet werden dürfen.

Niedrigenergie-Bauweise mit Konkretisierung von Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz kann derzeit im Bebauungsplan i. d. R. nicht vorgeschrieben werden. Eine zwingende Festsetzung von Sonnenkollektoren oder Photovoltaikanlagen ist im Bebauungsplan nicht möglich.

Das Rechtsinstrument des Städtebaulichen Vertrags (§ 11 BauGB) ermöglicht die Vereinbarung von baugebietsbezogenen Wärme- und Energieversorgungssystemen (z. B. Blockheizkraftwerke, Wärmespeicher) auch in Verbindung mit der Realisierung von Niedrigenergiebauweise. Die Ausweisung der dafür erforderlichen Flächen für Versorgungsanlagen und -leitungen erfolgt im Bebauungsplan auf Grundlage von § 9 (1) 12. u. 13. BauGB.

Auch Maßnahmen der Verkehrsplanung tragen zur Herabsetzung der Luftbelastung bei. Z. B. nehmen die kraftfahrzeugbedingten Schadstoffkonzentrationen mit zunehmender Entfernung zu einer Straße in der Regel stark ab. Abstandsflächen können hier Abhilfe schaffen.

Die Minderung von Schadstoffen durch Anpflanzungen von Bäumen und Sträuchern kommt zum einen durch die Filterwirkung der Pflanzen zustande (große

wirksame Oberfläche), was sich insbesondere bei staubförmigen Schadstoffen auswirkt, und zum anderen durch die Veränderung des Windfeldes.

Nach § 9 (1) 24. BauGB können im Bebauungsplan festgesetzt werden „die von der Bebauung freizuhaltenden Schutzflächen und ihre Nutzung, die Flächen für besondere Anlagen und Vorkehrungen zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes sowie die zum Schutz vor solchen Einwirkungen oder zur Vermeidung oder Minderung solcher Einwirkungen zu treffenden baulichen und sonstigen technischen Vorkehrungen.“

Nach § 9 (5) 1. BauGB sollen im Bebauungsplan Flächen gekennzeichnet werden, bei deren Bebauung besondere bauliche Vorkehrungen gegen äußere Einwirkungen erforderlich sind.

## 8 Ausblick

Wie in den Kapiteln 2, 3 und 4 beschrieben, stehen heute für die Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen sehr gute Methoden zur Verfügung. Zwingend erforderlich für die Zukunft ist die Festlegung von Mindeststandards, welche Untersuchungsmethode und welcher Untersuchungsaufwand mit welcher Genauigkeit zur Beantwortung der jeweiligen Frage angewendet werden sollte.

Nur wenn umweltmeteorologische Grundlagen rechtzeitig für die Anwendung aufgearbeitet und bewertet sind, besteht die Möglichkeit, dass die Umweltmeteorologie auf Vorhaben Einfluss nimmt. Dabei ist besonders wichtig, dass Umweltmeteorologen und ihre „Auftraggeber“ (Planer, Anlagenbetreiber, Politiker) dieselbe Sprache sprechen. Dieser interdisziplinäre Aspekt ist noch verbesserungsbedürftig (vgl. auch Kap. 6). Die Sprache des Planers findet sich z. B. im Baugesetzbuch in den Festsetzungsmöglichkeiten des Bebauungsplanes. Die Ergebnisse umweltmeteorologischer Untersuchungen sollten die dort genannten Instrumentarien aufgreifen. Planer arbeiten mit raumbezogenen Karten. Wo möglich, sollten daher umweltmeteorologische Erkenntnisse kartiert werden. Dies setzt von Umweltmeteorologen wiederum „Mut zur Lücke“ voraus, müssen doch möglicherweise punktuell ermittelte Ergebnisse flächenhaft interpoliert werden. Auch Bürger und politische Entscheidungsträger müssen die Belange Luft und Klima verstehen. Schließlich sind es meist politische Gremien, die im Rahmen der gesetzlich vorgeschriebenen Abwägung über das Zustandekommen von Planungen befinden. Die wichtigsten Aussagen sind unbedingt klar und plakativ in Kurzform zusammenzufassen. Eine hervorragende umweltmeteorologische Untersuchung kann sonst wertlos sein.

Die aktuelle Darstellung klimatischer und lufthygienischer Größen, z. B. im Internet, kann dazu beitragen, Bürger und Politiker für diese Themen zu sensibilisie-

ren (z.B. [www.stadtklima.de/stuttgart/windfeld/index.htm](http://www.stadtklima.de/stuttgart/windfeld/index.htm) oder [www.stadtklima.de/stuttgart/s-luft/stationen.htm](http://www.stadtklima.de/stuttgart/s-luft/stationen.htm) oder <http://wettermast-hamburg.zmaw.de/index.htm>).

## Literatur

- BÄCHLIN, W., W. J. MÜLLER, A. LOHMEYER, 2000: Vergleich von Modellanwendungen zur Berechnung von Immissionswerten innerhalb eines beidseitig bebauten Straßenquerschnitts. Forschungsvorhaben für BWPLUS, Forschungszentrum Karlsruhe, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe. Bericht herunterladbar von <http://bwplus.fzk.de>. For an english version see <http://www.lohmeyer.de/podbi>.
- BAUGESETZBUCH (BauGB) Neufassung vom 27.8.1997, BGBl. I S. 2141.
- BAUMÜLLER, J., U. HOFFMANN, T. NAGEL, U. REUTER, 1992: Klimaatlas, *Nachbarschaftsverband* Stuttgart, Hrsg.: Nachbarschaftsverband (jetzt Regionalverband) Stuttgart, 44 S., 36 Karten.
- BAUMÜLLER, J., U. REUTER, 1995: Die summarische Bewertung von Luftschadstoffen durch einen Luftbelastungsindex, *Staub-Reinhaltung der Luft* **55**, 137-141.
- BAUMÜLLER, J., U. HOFFMANN, U. REUTER, 1998: Städtebauliche Klimafibel – Hinweise für die Bauleitplanung –, Hrsg.: *Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg*, Stuttgart, 271 S.
- BAUNUTZUNGSVERORDNUNG (BauNV), Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke vom 23.1.1990 (BGBl: I S.132).
- BLAZEK, R., T. NAGEL, G. SCHÄDLER, W. BÄCHLIN, A. LOHMEYER, 1998: Kleinskalige klimatisch- lufthygienische Untersuchungen für das Gebiet A der Planung Stuttgart 21, Schriftenreihe *Untersuchungen zur Umwelt Stuttgart 21* **13**, Hrsg.: Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, 178 S.
- BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZ (BImSchG) i. d. F. vom 26.9.2002, BGBl. I S. 3830.
- DEUTSCHER HEILBÄDERVERBAND e.V., DEUTSCHER TOURISMUSVERBAND e. V. (Hrsg.), 1998: Begriffsbestimmungen – Qualitätsstandards für die Prädikatisierung von Kurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen, 11. Auflage, Bonn, 82 S. Anhang Durchführungsbestimmungen und Richtwerte zu Ziffer 3.2, 2000, Bonn, 15 S.
- EU RICHTLINIE 2002/3/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RA-TES über den Ozongehalt der Luft, 12.2.2002: *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften*, L 67 vom 9.3.2002, S. 14 – 30.
- GESETZ ÜBER DIE UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG (UVP) vom 5.9.2001, BGBl. I S. 2350.
- HELBIG, A., J. BAUMÜLLER, M. KERSCHGENS (Hrsg.), 1999: Stadtklima und Luftreinhaltung, *Springer Verlag*, Heidelberg, 467 S.
- KABA, 1998, Klimaanalyse der Region Basel (Begleittext zu den Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten, *Arbeitsgemeinschaft KABA*, Basel. 64 S.
- KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET (KVR) (Hrsg.), 1992: Synthetische Klimafunktionskarte, Ruhrgebiet, Essen, 68 S., 7 Karten.
- KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET (KVR), 2002, Klimaanalyse Stadt Essen, *Beiträge zum Umweltschutz* **29**, Hrsg.: Stadt Essen, Der Oberbürgermeister, Umweltamt, 183 S., 2 Karten.
- LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (Hrsg.), 2000: Stadtklima21-Grundlagen zum Stadtklima und zur Planung Stuttgart 21, CD-ROM, Amt für Umweltschutz.
- LANDESHAUPTSTADT DRESDEN, 1998, Stadtklima von Dresden, *Umweltbericht1998, Landeshauptstadt Dresden, Amt für Umweltschutz*. 38 S., 9 Karten.
- LOHMEYER, A., W. BÄCHLIN, E. J. PLATE, R. SEITZ, 1992: in *Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), Städtebauliche Klimafibel – Hinweise für die Bauleitplanung*, Stuttgart, S. 129.
- MAYER, H., F. KALBERLAH, D. AHRENS, U. REUTER, 2002: Analyse von Indizes zur Bewertung der Luft, *Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft* **62**, 177-183.
- MÜLLER U., 1997, Beziehungen zwischen urbanen Flächennutzungsstrukturen und klimatischen Verhältnissen am Beispiel der Stadtregion Leipzig, *UFZ-Bericht 2/1997, UFZ-Umweltforschungszentrum, Leipzig-Halle GmbH*, 58 S., 54 Abb.
- STADTKLIMA BAYERN, 1986, Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten. Bründl W., Mayer H., Baumgartner A., (Hrsg.) *Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München*, 346 S.
- TA-LUFT, Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) vom 24.7.2002, *GMBI*, S. 511.
- UMWELTATLAS BERLIN, 1985: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, seit 1995 auch in digitaler Form im Internet.
- VDI 2310 (diverse Blätter), Maximale Immissionskonzentrationen, *Beuth-Verlag*, Berlin.
- VDI 3783 (diverse Blätter) Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre, *Beuth-Verlag*, Berlin.
- VDI 3786 (diverse Blätter) Umweltmeteorologie – Meteorologische Messungen –, *Beuth-Verlag*, Berlin.
- VDI 3787 Blatt 1 Umweltmeteorologie, 1997: Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, *Beuth-Verlag*, Berlin, 73 S.
- VDI 3787 Blatt 2 Umweltmeteorologie, 1998: Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima, *Beuth-Verlag*, Berlin, 29 S.
- VDI 3787 Blatt 9, Umweltmeteorologie, 2002: Die Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in der Stadt- und Regionalplanung (Gründruck).
- VDI 3945 Blatt 3 Umweltmeteorologie, 2000: Atmosphärische Ausbreitungsmodelle Partikelmodell, *Beuth-Verlag*, Berlin, 60 S.
- WHO, 1987: Air quality guidelines for Europe, WHO regional publications, European Series, No. 23, 426 S.
22. VERORDNUNG ZUM BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZ (22. BImSchV), 2002: Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft vom 11.9.2002, BGBl. I S. 3626.
23. VERORDNUNG ZUM BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZ (23. BImSchV), 1996: Verordnung über die Festlegung von Konzentrationswerten vom 16.12.1996, BGBl. I S. 1962.

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, NO<sub>2</sub>, CO, Schwebstaubfraktionen, VOCs oder Ozon), sondern auch auf klimarelevante Substanzen (z. B. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 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

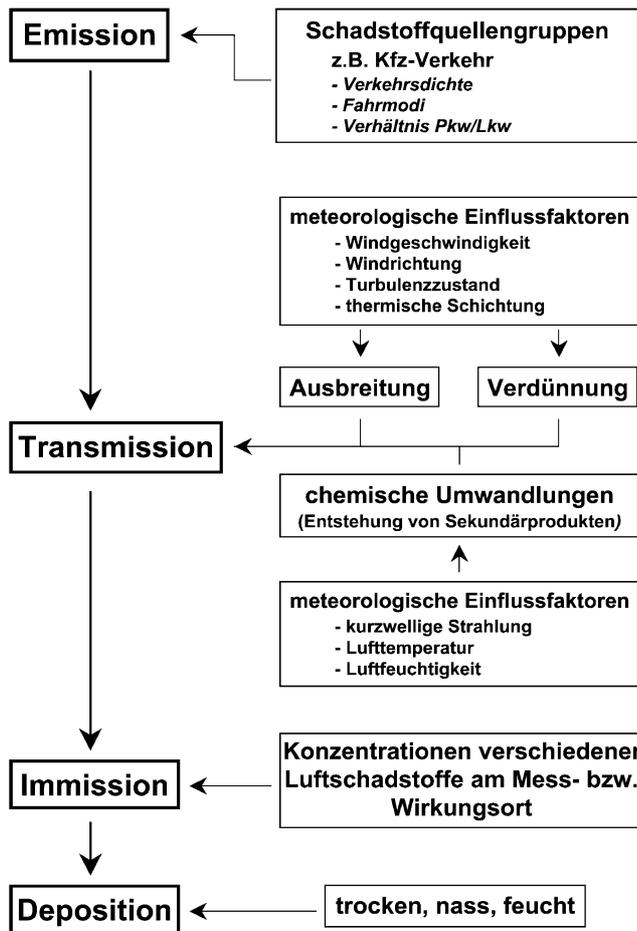


Abb. 6-1: Kausalkette für Luftbeimengungen mit ausgewählten Einflussfaktoren (nach MAYER 2000).

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, CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Untersuchung von Standorten in Bezug auf ihr Potenzial für Solar- und Windenergieanlagen.

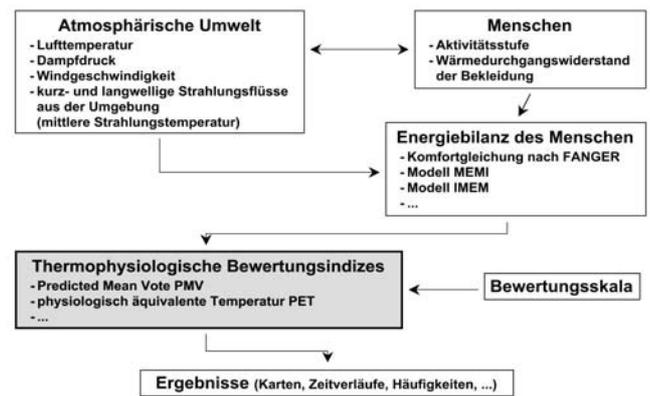


Abb. 6-2: Schema zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas.

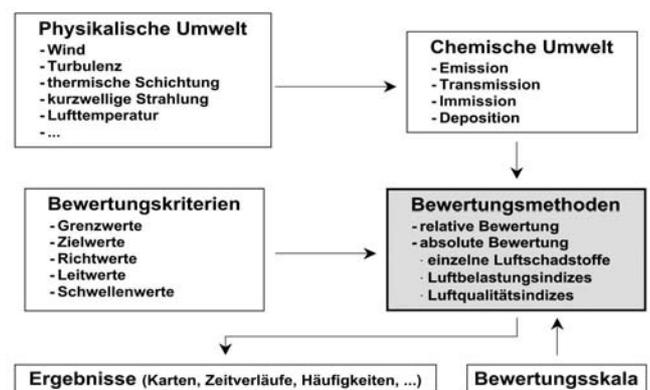


Abb. 6-3: Schema zur human-biometeorologischen Bewertung der lufthygienischen Komponente des Klimas.

### 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 Luftreinhaltung (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 NO<sub>2</sub> (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<sub>x</sub>-Emissionen vermuten ließe.

b) Entwicklung der jährlichen Emissionen des klimarelevanten Gases CO<sub>2</sub> (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 CO<sub>2</sub>-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.

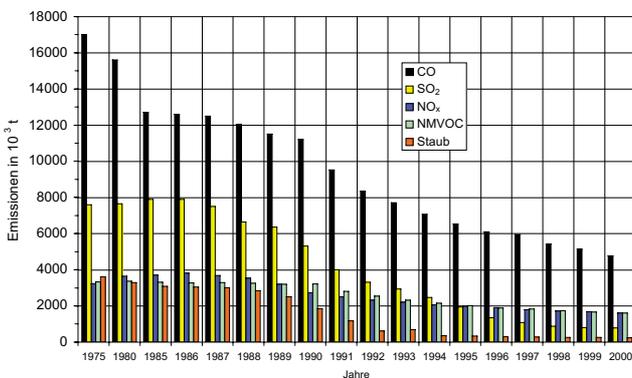


Abb.6-4: Jährliche Emissionen von „klassischen“ Luftschadstoffen in Deutschland (nach Angaben des Umweltbundesamtes).

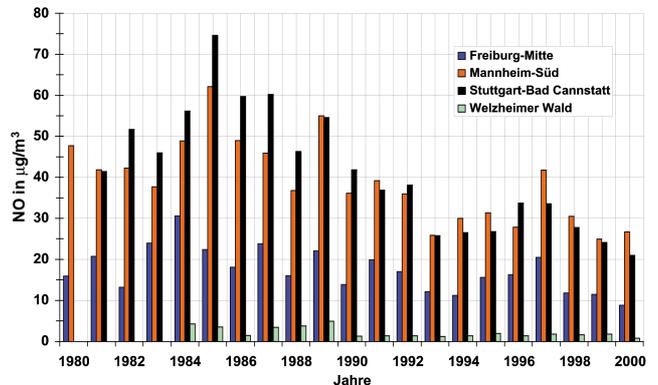


Abb.6-5: NO Jahresmittelwerte an ausgewählten amtlichen Luftmessstationen in Baden-Württemberg (nach Angaben der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg).

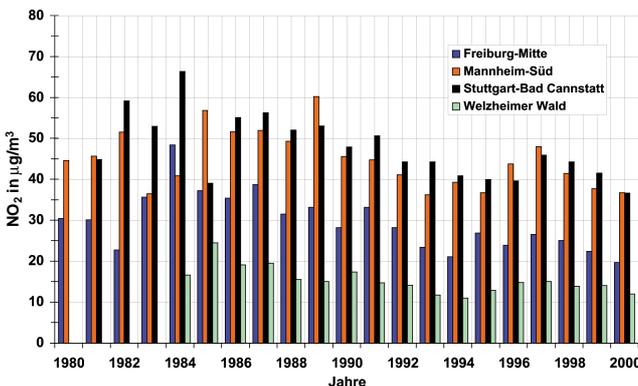


Abb.6-6: NO<sub>2</sub> Jahresmittelwerte an ausgewählten amtlichen Luftmessstationen in Baden-Württemberg (nach Angaben der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg).

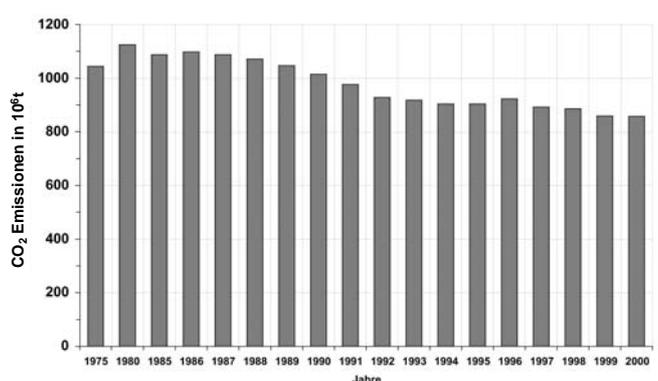


Abb.6-7: Jährliche CO<sub>2</sub> Emissionen in Deutschland (nach Angaben des Umweltbundesamtes).

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 Maßstabsebene sowie nach human-biometeorologischen Wirkungsbezügen und sozioökonomischen Konsequenzen angeordnet.

##### a) Globale Maßstabsebene

- 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 CO<sub>2</sub>-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<sup>IV</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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. 13<sup>th</sup> 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. 2<sup>nd</sup> 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.

## Blick nach draußen



# ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT (OMSZ)

## Der meteorologische Dienst Ungarns



### Von der Wissenschaft zur Bereitstellung von Dienstleistungen

Die ersten meteorologischen Messungen führte in Ungarn Ádám Gensili 1717 in Sopron zu rein wissenschaftlichen Zwecken durch. Darüber hinaus waren sie Teil des internationalen meteorologischen Messnetzes der 1780 gegründeten Mannheimer *Societas Meteorologica Palatina*. Eine der 8 Stationen war Buda, die für die gesamte Dauer des Bestehens der Gesellschaft in Betrieb war. Die Daten wurden veröffentlicht in den Mannheimer Ephemeriden (s. Abb. 1).

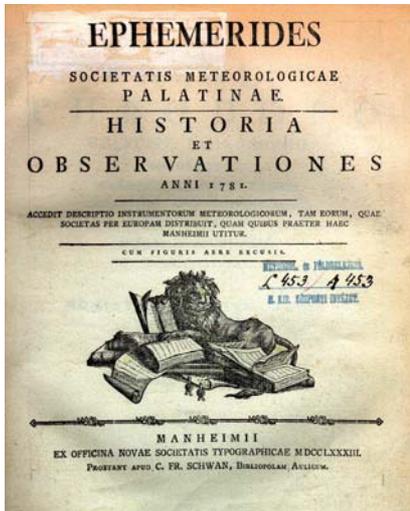


Abb. 1:  
Titelseite der Mannheimer Ephemeriden des Jahres 1781.

Zwei Ereignisse trugen wesentlich zur Gründung des ungarischen Wetterdienstes bei:

- Zum einen erfolgte mit der Gründung der „Zentralanstalt für den meteorologischen und magnetischen Dienst“ im Jahre 1851 in Österreich, ein Signal in Richtung Ungarn, einem Teilland der Österreichisch-Ungarischen Doppelmonarchie. Siehe dazu auch: „150

Jahre Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien“ in: *promet*, 27. Jahrg., Heft 3/4, S. 168-170.

- zum anderen kam der Vorschlag zur Einrichtung eines Meteorologischen Instituts von der 1827 gegründeten ungarischen Akademie der Wissenschaften.

Franz Josef I, Kaiser von Österreich und apostolischer König von Ungarn, unterzeichnete am 8. April 1870 die Gründungsurkunde über das „*Königlich Ungarische Institut für Meteorologie und Erdmagnetismus*“. Diese Verfügung wurde im Amtsblatt vom 3. Mai 1870 veröffentlicht. Guido Schenzl, ein Benediktinermönch und -lehrer, wurde zum Leiter des Instituts ernannt. Der Jahrestag der Gründung des ungarischen Wetterdienstes wird von den Mitarbeitern alljährlich mit reichlich Bier und Würstchen gefeiert.

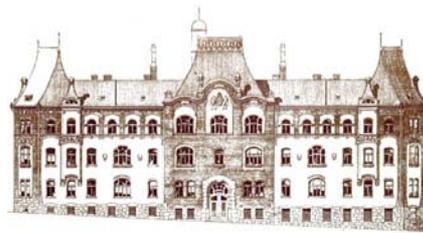


Abb. 2:  
Die 1911 erbaute Zentrale des ungarischen Wetterdienstes in Budapest.

Ungarn gehörte im Jahre 1873 zu den 20 Gründungsstaaten der Internationalen Meteorologischen Organisation (IMO). In die Zeit der Leitung des Meteorologischen Instituts durch Guido Schenzl fiel auch das erste Internationale Polarjahr (1882-1883). Das Institut beteiligte sich an diesem internationalen Forschungsprogramm, das später anderen Vorhaben als Beispiel diente, u. a. den großräumigen Experimenten im **Global Atmospheric Research Programme (GARP)**.

Eine bedeutende Aufgabe des Meteorologischen Instituts Ende des 19. Jahrhunderts war die wissenschaftliche Begleitung bei der Verwirklichung eines der größten Wasserregulierungsprojekte in Ungarn. Wegen der erfolgreichen Umsetzung dieses Vorhabens wurde das Institut nicht mehr dem Ministerium für Erziehung sondern nunmehr dem Ministerium für Landwirtschaft zugeordnet. Damit verbunden war auch eine Umorientierung des Wetterdienstes, der nun einen größeren Bezug zur Praxis erhielt: ab 1891 wurden tägliche Wetterberichte herausgegeben, ab 1896 tägliche Wettervorhersagen.

Die kontinuierliche Fortentwicklung des Ungarischen Wetterdienstes wurde durch die beiden Weltkriege unterbrochen. Dennoch hielten die Meteorologen in Ungarn stets den Anschluss an die internationalen Standards und versuchten trotz der Abschottung zu Zeiten des Sozialismus an den Entwicklungen in Forschung und Technik teilzuhaben.

Die Erforschung des Erdmagnetismus gehörte bis 1950 zu den Aufgaben des Wetterdienstes. Danach wurde sie dem Geophysikalischen Institut übertragen, so dass die Meteorologie als alleinige Aufgabe verblieb. Der rechtliche Status des Meteorologischen Instituts und das übergeordnete Ministerium wechselten in den nächsten Jahren mehrfach, ein Zeichen für die große wirtschaftliche Bedeutung meteorologischer Informationen.

In der Zeit des politischen Umbruchs wurde der ungarische Wetterdienst im Jahre 1988 dem neu eingerichteten Ministerium für Umwelt und Wasserwirtschaft unterstellt. Zunehmende finanzielle Schwierigkeiten führten dazu, dass zwischen 1990 und 1992 etwa 60 % des Personals entlassen werden mussten und demzufolge eine Umstrukturierung ähnlich wie in den westlichen

öffentlich-rechtlichen Einrichtungen erfolgte: weg von der reinen Wissenschaft, hin zur Bereitstellung von Dienstleistungen.

### Modernisierung

Der Meteorologische Dienst Ungarns (ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT, OMSZ) ist nunmehr eine staatliche Einrichtung, die für alle Aufgaben im Bereich der atmosphärischen Umwelt in Ungarn zuständig ist. Die finanziellen Mittel des Dienstes werden zum Teil aus dem Staatshaushalt bereitgestellt, aber mehr als die Hälfte stammt aus kommerziellen Aktivitäten und von wissenschaftlichen Stiftungen.

Aufgrund seiner Entwicklungsgeschichte hat der OMSZ die Aufgabe, Daten und Informationen zu sammeln und auszuwerten. Dies geschieht mit etwa 300 Mitarbeitern, die Hälfte davon mit Universitätsabschluss, unter denen 20 mit einem akademischen Titel (Doktor oder Ph.D.). Außerdem sind im OMSZ, dessen derzeitige Organisationsstruktur aus dem Jahre 1999 datiert, ein rundes Dutzend Doktoranden tätig.

### Standorte

Abgesehen von dem in der Stadtmitte von Budapest gelegenen Hauptgebäude befindet sich im Vorstadtgebiet das Hauptobservatorium des ungarischen Wetterdienstes. Derzeit entstehen landesweit sogenannte „Regionalzentren“: für den Norden in *Miskolc*, für den Osten in *Debrecen*, für den Süden in *Szeged*, für den Westen in *Győr* und für den mittel-westlichen Teil Transnubiens in

*Siófok*. Letztere liegt am Plattensee und ist zusätzlich mit der Spezialaufgabe des Sturmwarndienstes für den Platten- und den Velence-See betraut (s. Abb. 3).

### Beobachtungsnetz

Die Automatisierung des meteorologischen Messnetzes wurde 1999 abgeschlossen. Die Sammlung und Übermittlung meteorologischer Daten aus dem bodennahen Bereich erfolgt durch 29 automatische synoptische Wetterstationen, 59 automatische und 12 traditionelle Klimastationen, sowie 590 mit ehrenamtlichen Beobachtern besetzten Niederschlagsmessstationen.

Drei Wetterradargeräte decken das gesamte Gebiet Ungarns ab. Zwei davon sind bereits automatisiert, das dritte wird gerade umgestellt. Blitzaktivitäten werden von dem Blitzortungssystem SAFIR erfasst. Als EUMETSAT Co-operating State stehen auch digitale Satellitenbilder von METEOSAT in halbstündlicher Aktualisierung zur Verfügung. Sobald die MSG-Empfangsanlage fertig gestellt sein wird, werden die Bilder sogar in viertelstündlichem Abstand verfügbar sein.

Täglich werden zwei Radiosondenaufstiege in Budapest (00, 12 UTC) und einer in Szeged (00 UTC) durchgeführt.

Im Jahre 2003 wurden neue Projekte begonnen, um Windprofile in der unteren Troposphäre mit Hilfe von Windprofilern (SODAR- und RASS-Messungen) zu erfassen.

An vier regionalen Hintergrundstationen wird kontinuierlich die Luftqualität analysiert und ferner landesweit an 23 Stationen die Radioaktivität mit Gamma-Dosismessgeräten gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen werden auf der Internetseite des OMSZ bereitgestellt ([http://omsz.met.hu/tajekoztato/tajekoztato\\_hu.php](http://omsz.met.hu/tajekoztato/tajekoztato_hu.php)).

### Wettervorhersagen

Der OMSZ ist vor allem durch seine Wettervorhersagen bekannt. Allgemeine Vorhersagen werden für die Zeiträume: Kurzfrist (12 Stunden), Kurzfrist (36 Stunden), Mittelfrist (bis zu 10 Tagen) und Langzeit (1-6 Monate) erstellt.

Die Wettervorhersage stützt sich hauptsächlich auf die numerischen Vorhersagemodelle internationaler Einrichtungen ab. In diesem Zusammenhang hat der OMSZ Abkommen mit dem Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) über die Zusammenarbeit abgeschlossen und ist Mitglied der LACE-Kooperation (Limited Area model for Central Europe).

Die Entwicklung eines eigenen Nowcasting-Systems ist eine der bedeutenden Arbeiten der letzten Jahre. Anhand von meteorologischen Grundvariablen und abgeleiteten Größen beschreibt dieses Nowcasting-System die aktuelle synoptische Situation und deren Entwicklung im Kurzfristbereich (0-6 Stunden).

Die Beteiligung an dem Projekt ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International), in dem international an der numerischen Wettervorhersage für den Kurzfristbereich (0-48 Stunden) gearbeitet wird, ist eine der vorrangigen Tätigkeiten. Die lokale Variante des Limited Area-Modells ALADIN (ALADIN/HU) wird operationell in Budapest betrieben. ALADIN läuft auf dem IBM Regatta Supercomputer des OMSZ mit einer horizontalen Auflösung von 6,5 km und 37 vertikalen Schichten.

Die Mittelfristvorhersage (2-10 Tage) erfolgt auf der Grundlage der Produkte des EZMW. Die bedeutendste Verbesserung, die in diesem Bereich erzielt wurde, ist die Erweiterung des Anwendungsspektrums von Ensemble-Vorhersagen.



Abb. 3: Blick von der Station Siófok über den Plattensee.

Spezielle Vorhersagen werden für hydrologische Zwecke, für die Luftfahrt und für den Sturmwarndienst am Platten- und am Velence-See erstellt. Das *Siófoker Observatorium für Sturmwarnungen* ist eine Einrichtung mit besonderen Aufgaben. Starkwind bzw. Sturm und deren Windböen stellen im Umfeld von Seen die größte Gefahr dar. Für die Sicherheit von Leben und Eigentum sind Sturmwarnungen daher von entscheidender Bedeutung.

Bei Bedarf werden auf Anfrage des Zivilschutzes Wetterlagen im Zusammenhang mit Umweltschutz, Katastrophen und Industrieunfällen gutachterlich bearbeitet. Spezielle Vorhersagen werden auch für Energie-, Bau- und Landwirtschaft bereitgestellt.

Alle Analyseprodukte und Modellergebnisse werden auf dem Visualisierungssystem HAWK (**H**ungarian **A**dvanced **W**orkstation), einem komplexen meteorologischen Visualisierungssystem bereit gehalten. Es ist in der Lage, alle verfügbaren Informationen (Beobachtungen, Produkte der numerischen Wettervorhersage usw.) anschaulich darzustellen.

Der auffälligste Tätigkeitsbereich ist die Medien-Meteorologie. Der OMSZ besitzt ein eigenes Fernsehstudio (s. Abb. 4), in dem der Meteorologe die Möglichkeit hat, die Zuschauer direkt mit Informationen zu versorgen, die auf den neuesten Daten beruhenden. Auch zahlreiche Zeitungen erhalten ihre Wettervorhersagen vom ungarischen Wetterdienst. Die Wettervorhersagen des OMSZ mit Hinweisen auf jahreszeitliche meteorologische Besonderheiten und gelegentlich ergänzt durch Spezialkommentare werden regelmäßig in den verschiedenen landesweiten und regionalen Zeitungen, Wochen- und Monatszeitschriften veröffentlicht. Die Herausgabe von Pressemitteilungen ist inzwischen fast zu einem Automatismus geworden. Als besondere Dienstleistung wird ein automatischer Ansagedienst und eine Live-Telefonberatung angeboten.

Wetterinformationen sind durch entsprechende Vereinbarungen mit den Mobiltelefongesellschaften auch per WAP verfügbar.

**Klimainformationen**

Die umfangreiche Menge an Daten dient nicht nur dem unmittelbaren synoptischen Bedarf, sondern sie werden archiviert, um

mit ihnen für die verschiedenen Bereiche der Wirtschaft entsprechende Klimagutachten anfertigen zu können. Die Daten werden in einer ORACLE-Datenbank strukturiert abgelegt und können von den Workstations aus abgerufen werden.

Die häufigste Aufgabe ist die Beratung von Polizei und Gerichten. Die Dienstleistungen für die Landwirtschaft bestehen in speziellen Vorhersagen und sonstigen meteorologischen Gutachten, die von Agrarmeteorologen erstellt werden. Der Monatsbericht, der eine kurze Beschreibung des Wetters des Vormonats enthält, erscheint regelmäßig und ist auch auf der Internetseite des OMSZ verfügbar.

Seit 2001 ist ein neuer Klimatlas für Ungarn für den Zeitraum 1961 bis 1990 erhältlich (siehe dazu Abb. 5 und 6). Er enthält die wichtigsten Kennzahlen der klimatischen Größen sowie deren räumliche und zeitliche Verteilung in Bodennähe und höheren Schichten der Atmosphäre. Einige seit 1990 verfügbare neue Techniken (z. B. Satellitenbilder, Radarechos und Blitzmesssystem), die zusätzliche Informationen liefern, sind ebenfalls in dem Atlas dargestellt.

**Informations- und Telekommunikationstechnologie**

Der Transfer und die Analyse der gewaltigen Datenmenge erfordern ein Höchstmaß an Informationstechnologie. Die größte Herausforderung ist die Aufbereitung und Verbreitung der Informationen für spezielle Nutzer aus den verschiedensten Bereichen der Wirtschaft.

Der meteorologische Hochleistungs-Telekommunikationsrechner des ungarischen Wetterdienstes und die Netzwerkrouter sind gleichermaßen geeignet für den Empfang von Telekommunikationsver-

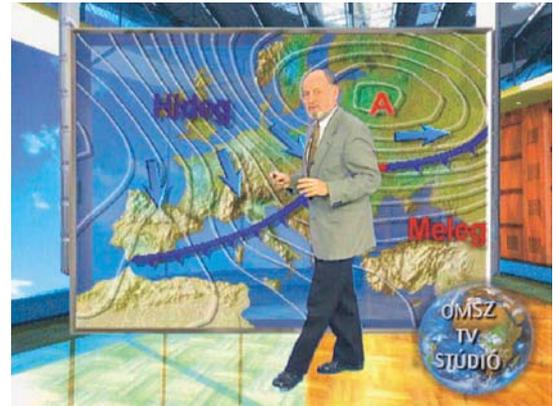


Abb. 4: Medienmeteorologe im Fernsehstudio.

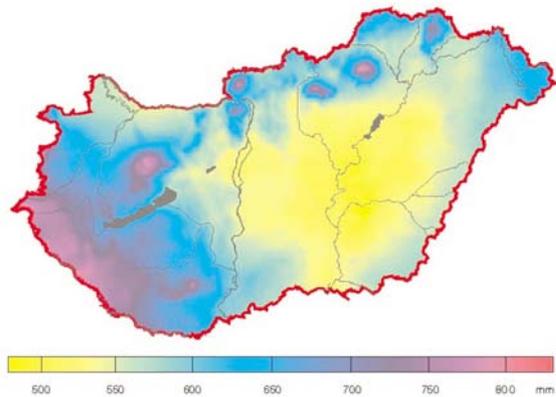


Abb. 5: Karte der Jahressummen des Niederschlags in Ungarn (Mittel 1961-1990).

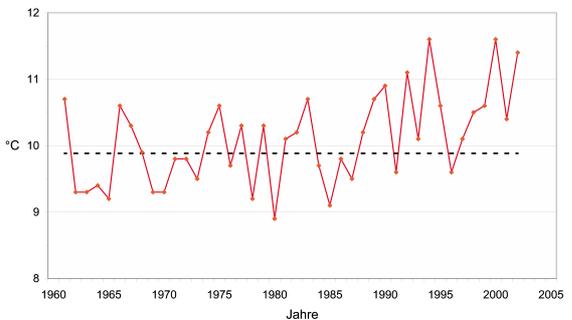


Abb. 6: Langjähriger Trend der Jahresmitteltemperaturen aus 38 Stationen Ungarns der Jahre 1961 bis 1990 sowie das zugehörige langjährige Mittel.

bindungen über Miet-Leitungen, geswitchte Netzwerke sowie terrestrische oder über Satelliten geschaltete Kanäle.

Der Betrieb des aus über 300 Workstations bestehenden Netzwerks wird von mehreren Hochleistungs-Computern unterstützt. Zu diesen gehören u. a. der IBM Regatta (der Supercomputer, auf dem das ungarische Regionalmodell läuft), ein Silicon Graphics Origin 2000 mit 16 Prozessoren, die Hewlett Packard-Computer der K- und D-Serie (auf denen die ORACLE-

Datenbank betrieben wird und die verschiedenen Server-Aufgaben erfüllen), sowie der vollständig gedoppelte meteorologische Vermittlungsrechner.

Zur Einrichtung eines zentralen Datenarchivs wurde eine Speichereinheit mit einer Kapazität von 2 TByte installiert.

### Forschung und Entwicklung

Der Bereich Forschung und Entwicklung ist eine wesentliche Stütze der hohen Qualität der Arbeit des Institutes. Hier wird die Einführung neuer Beobachtungsmethoden und Telekommunikationstechniken, sowie die praktische Anwendung der wissenschaftlichen Forschungsergebnisse entwickelt und anschließend in die Praxis umgesetzt. Da der Mitarbeiterstab des ungarischen Wetterdienstes relativ klein ist, müssen sich die Bemühungen auf einige wenige Forschungsgebiete konzentrieren, wie z. B. Anwendungsbereiche innerhalb der Meteorologie und die Analyse von Umweltbedingungen. Dennoch ist der OMSZ bereit und in der Lage, neue Technologien in einem breiten Spektrum der Meteorologie aufzunehmen und anzuwenden.

#### Hauptforschungsgebiete:

- Nowcasting, einschließlich der Nutzung von Fernerkundungsdaten,
- Kurzfrist-Vorhersagemodell, insbesondere Datenassimilation und bodennahe Prozesse,
- Umweltmeteorologie: CO<sub>2</sub>-Haushalt, Spurengasanalyse, Dispersionsmodelle,
- mathematische Methoden zur Homogenisierung und Interpolation von Klimadaten.

### Internationale Zusammenarbeit

Die wichtigste Komponente der internationalen Aktivitäten des ungarischen Wetterdienstes ist die Mitarbeit in der Weltorganisation für Meteorologie, und zwar schon seit der Gründung der IMO.

Der Weg in Richtung Europa wurde ungefähr vor 10 Jahren eingeschlagen. 1994 erhielt Ungarn als einer der ersten mittel-

und osteuropäischen Staaten beim EZMW den Status eines Zusammenarbeitsstaates (Co-operating State). Seit 1998 ist der ungarische Wetterdienst Mitglied bei ECOMET, der Organisation, die die wirtschaftlichen Aktivitäten der nationalen Wetterdienste in den westeuropäischen Staaten koordiniert. Ungarn wurde im Juli 1999 auch Co-operating State bei EUMETSAT. Zusätzlich arbeitet der ungarische Dienst in vier EUMETNET-Programmen mit: ECSN (European Climate Support Network), MAP (Mesoscale Alpine Project), OPERA (Operational Programme for the Exchange of Weather Radar Information) und SRNWP (Short Range Numerical Weather Prediction). Es gibt Überlegungen, EUMETNET-Vollmitglied zu werden.

Die meteorologischen Aspekte des Umweltschutzes werden in Europa durch EMEP (European Monitoring and Evaluation Program) wahrgenommen, in dessen Rahmen der OMSZ eine aktive Rolle spielt.

Die ICCED-Konferenz der mitteleuropäischen Wetterdienstdirektoren (Informal Conference of Central European Directors) befasst sich mit allen wissenschaftlichen und technischen Fragen der acht nationalen Wetterdienste in Mitteleuropa (Österreich, Kroatien, Tschechische Republik, Deutschland, Ungarn, Polen, Slowakei, Slowenien). Die Zusammenarbeit bei der Umsetzung modernster Techniken der Kurzfristvorhersage wird im Rahmen des 1994 ins Leben gerufenen LACE-Programms weitergeführt. Daran beteiligt sind die nationalen Wetterdienste von sechs Ländern: Österreich, Kroatien, Tschechische Republik, Ungarn, Slowakei und Slowenien.

### ISO-Zertifizierung

Die Arbeit des Meteorologischen Dienstes Ungarns ist einzigartig und breitgefächert, dennoch ist sie den gesetzlichen Bestimmungen unterworfen und in letzter Konsequenz von der Zufriedenheit der Kunden abhängig. Das macht kontinuierliche Verbesserungen erforderlich. Daher hat der

OMSZ nach einjähriger Vorbereitung im Sommer 2002 für die gesamte Palette seiner Dienstleistungen ein Qualitätsmanagementsystem gemäß **ISO 9001:2000** eingeführt. Nach einer Testphase von etwa sechs Monaten erstellten die Experten der SGS Hungária Kft, einem Mitglied des internationalen Zertifizierungskonzerns **SGS-ICS**, dann das Audit zur Zertifizierung. Das Audit war erfolgreich und so wurde das Qualitätsmanagementsystem des ungarischen Wetterdienstes von dem leitenden Prüfer des Zertifizierungsunternehmens für die internationale Registrierung empfohlen. Das Zertifikat, mit dem die Registrierung beurkundet wird, wurde am 6. Dezember 2002 von der **SGS Yarsely International Certification Services Limited** in England, einer bei **UKAS (United Kingdom Accreditation Service)** registrierten, akkreditierten Zertifizierungsorganisation, ausgestellt.

Dieses Zertifikat ist ein Meilenstein in der Geschichte des OMSZ, der damit als erster Wetterdienst Europas für die gesamte Bandbreite seiner Tätigkeiten eine international anerkannte Qualitätszertifizierung erhalten hat. Weltweit nimmt der ungarische Wetterdienst in dieser Hinsicht den dritten Platz ein, was für das OMSZ eine große Errungenschaft ist. In der ungarischen Fassung des Zertifikats wird der Zertifizierungsgegenstand folgendermaßen beschrieben:

*„Durchführung von meteorologischen Beobachtungen, Erhebung und Verarbeitung von Daten, Erstellung verschiedener Arten meteorologischer Informationsprodukte und Bereitstellung von Dienstleistungen für Nutzer.“*

Ph.D Márta Hunkár Zemankovics  
Wissenschaftliche Sekretärin OMSZ  
Hungarian Meteorological Service  
1525 Budapest  
P.O.B. 38  
Tel: 0036 1-346 4619  
Fax: 0036 1-346-4669  
E-Mail: hunkar.m@met.hu  
<http://www.met.hu>

## Institute stellen sich vor

# Die Professur Meteorologie an der Technischen Universität Dresden

### 1 Geschichte

Die Meteorologie an der damaligen Technischen Hochschule (seit 1962 Technische Universität) in Dresden wurde 1953 per Dekret des zuständigen DDR-Ministers als „Institut für forstliche Meteorologie und Klimakunde“ gegründet. Vorher waren die Belange der Meteorologie von verschiedenen Lehrenden wahrgenommen worden, zuletzt im Lehrauftrag von J. Goldschmidt (Wetterwarte Radebeul Wahnsdorf). Entsprechend der Absicht, die Rolle des Klimas als Standortfaktor für die Vegetation – und damit als Faktor der forstlichen Produktion – hervorzuheben, war das neugegründete Institut Teil der Forstfakultät. Diese ist traditionell in Tharandt südwestlich von Dresden beheimatet. 1954 wurde Hermann Pleiß als Professor berufen, der mit zunächst wenigen Mitarbeitern das Institutsgebäude in Tharandt, Pienner Straße 9, bezog (Abb. 1). Das Gebäude wurde anfänglich noch mit der Dozentur für Marxismus-Leninismus geteilt, was ohne weitere Wirkung auf die dort beschäftigten Meteorologen blieb. Die Aufgaben konzentrierten sich in der Lehre auf die Ausbildung der Forststudenten und in der Forschung auf den Wärme- und Wasserhaushalt. Ende der fünfziger Jahre wurde der erste forstliche

Messturm in Tharandter Wald errichtet, in den sechziger Jahren fanden bereits intensive Messkampagnen mit Energiebilanzstationen statt und erste Untersuchungen zur Schädigung von Vegetation durch Industrieabgase („Rauchschäden“). 1967 wurde im Tharandter Wald das Einzugsgebiet des Wernersbaches mit Abfluss- und Niederschlagsmessungen instrumentiert. Bemerkenswert ist die dabei errichtete Betonmauer, die beim Hauptwehr den Grundwasserabfluss des 4,6 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebietes vollständig abblockt. Wie der forstliche Messturm am Wildacker waren diese hydrologischen Messungen als Dauermessungen konzipiert und wurden vom technischen Personal des Instituts regelmäßig dreimal pro Woche besucht und gewartet. Als prägende Wissenschaftler waren Günther Flemming (Rauchschadensforschung, regionales Klima) und Horst Junghans (Geländeklima, Strahlung) beschäftigt.

1968 wurden die Institute und Fakultäten an den Universitäten der DDR aufgelöst. Die Meteorologie gehörte nun als „Lehrgebiet“ gemeinsam mit dem neuen „Lehrgebiet Hydrologie“ in Dresden zur „Sektion Wasserwesen“ und hatte zusätzlich einen hohen Anteil am Hauptstudium des

neuen Studienganges Hydrologie. Sie blieb aber in Tharandt angesiedelt. In der Forschung war die Hydrometeorologie ein neuer Schwerpunkt, den G. Flemming übernahm. Generell nahm der politische Einfluss auf Lehre und Forschung ständig zu und erschwerte, neben der Behinderung im wissenschaftlichen Austausch mit dem „kapitalistischen Ausland“ und den durch die z.T. anhaltende Mangelwirtschaft bedingten technischen Problemen, die Arbeit zusehends. Entsprechend den Interessen Prof. Pleiß' blieb der Schwerpunkt auf der experimentellen Arbeit, vermehrt ausgerichtet auf den Wasserhaushalt (Bau eines Lysimeters und einer Schneewaage). Nach dem frühen Tod von Junghans übernahm sein Nachfolger Eberhardt Freydank die eher theoretischen Aspekte im Rahmen von Forschung und Lehre.

Professor Pleiß ging 1986 in den Ruhestand und wurde durch Gerd Peschke ersetzt, der als langjähriger Assistent von Siegfried Dyck (Professor für Hydrologie seit 1968) besonders die Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt im Wernersbach vorangetrieben hatte. In dieser Zeit wurden die meisten Stellen neubesetzt: Horst Hebertanz, Heiko Prasse und Uwe Eichelmann übernahmen die umfangreichen technischen Aufgaben des Instituts; Christina Seidler (schon unter Pleiß Mitarbeiterin des Lehrstuhls) intensivierte die Arbeit zur Agrarmeteorologie und Phänologie. Eberhardt Freydank ging nach seiner Habilitation zum Wetterdienst nach Radebeul; seine Stelle übernahm der Hydrologe Konrad Miegel (seit 1998 Professor für Hydrologie in Rostock). Als Physiker nahm Professor Peschke bald auch die meteorologischen Vorlesungen für Hydrologen wahr und intensivierte die Zusammenarbeit mit den Tharandter Institutionen. Durch die neuen Möglichkeiten seit 1990 wurden



Abb. 1:  
Historisches Foto  
des Institutsgebäudes  
in Tharandt,  
Pienner Straße 9 vor  
der Flut vom August  
2002 (Aufnahme vom  
Ende der neunziger  
Jahre).

unter seiner Leitung wesentliche Erweiterungen am Messnetz im Tharandter Wald und im Erzgebirge vorgenommen.

Mit der Hochschulerneuerung war zunächst weder der Fortbestand des Wasserwesens noch die Zuordnung der Meteorologie sicher. Nach der Neugründung der Fakultäten war das Wasserwesen in die große Fakultät Bau-Wasser-Forst eingegliedert; Hydrologie und Meteorologie bildeten ein gemeinsames Institut. 1992/93 wurden die meisten Stellen der Meteorologie befristet. Günther Fleming (seit langem habilitiert und aus politischen Gründen bis zur Wende an der weiteren Hochschulkarriere behindert) wurde Professor für Bioklimatologie am Institut für Ökologie in Tharandt und war bis zu seinem Ruhestand für die Lehre der Forststudenten zuständig. Ich selbst folgte 1993 Peschke nach, der 1994 den Lehrstuhl für Umweltsystemanalyse am Internationalen Hochschulinstitut in Zittau (bis zu seinem Tod 2001) übernahm. Bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern übernahmen Franz Berger (ab 1995), Lothar Zimmermann (1996 bis 1999 als Nachfolger von Konrad Miegel) und Valeri Goldberg (ab 1999) wichtige Teilgebiete.

Das Augusthochwasser 2002 hat die Professur in Tharandt schwer getroffen.



Abb. 2: Überflutetes Tal der Wilden Weißeritz in Tharandt am 14.08.2002. Vordergrund: Meteorologisches Messfeld, rechts die umströmte Klimahütte, links Institutsgebäude. Hintergrund: Cotta-Bau (TU Dresden, Fachrichtung Forstwesen). Foto: U. Eichelmann.

Das angestammte Gebäude hatte zwar den Fluten standgehalten, war aber bis zur Oberkante Erdgeschoss vollständig von Schlamm erfüllt, die Werkstätten zerstört. Die Nebengebäude (große Teile der Werkstatt und die Garage) mussten vollständig abgerissen werden. Das langjährige Messfeld existierte nach der Flut nicht mehr (Abb. 2).

## 2 Arbeitsschwerpunkte

In den letzten zehn Jahren hat sich das Arbeitsfeld der Meteorologie an der TU Dresden deutlich erweitert, möglichst ohne die traditionellen Stärken zu vernachlässigen. Die experimentell ausgerichteten Arbeiten wurden sogar weiter verstärkt und durch die Satellitenmeteorologie ergänzt. Gleichzeitig wurden Arbeiten zur Modellierung der Atmosphäre (Grenzschicht- und Regionalmodelle) be-

gonnen. Die Messung und Modellierung des Wasserhaushaltes wurde fortgesetzt, die Hochwassermodellierung aber den Hydrologen allein überlassen. Forschung und Lehre sind entsprechend der Aufgabe der Universität gleichberechtigte Säulen im Selbstverständnis der Professur und ihrer Mitarbeiter.

## 3.1 Forschung

Im Klimasystem mit seinen vielfältigen Vernetzungen und Rückkopplungen ist eine isolierte Betrachtung einzelner Prozesse kaum möglich und wohl auch nicht sinnvoll. Trotzdem bleibt ein fundiertes Prozessverständnis der Schlüssel zum Verstehen der Natur über Analyse und Modellbildung. Hier ist der gemeinsame Rahmen der Forschung an der Professur Meteorologie die „Oberflächen-Atmosphären-Wechselwirkung“ und zwar in der dafür notwendigen, d. h. meist mikroskaligen bis mesoskaligen Auflösung. Die Ergebnisse der Forschung werden in der Reihe *Tharandter Klimaprotokolle* abgedruckt.

Zur Bewältigung der Forschungsaufgaben hat sich eine Struktur mit drei Arbeitsgruppen bewährt.

### Arbeitsgruppe „Messungen an der Erdoberfläche und Biometeorologie“ (Christian Bernhofer)

Hier steht die kontinuierliche Messung konventioneller meteorologischer Größen sowie von Energie- und Stoffflüssen,

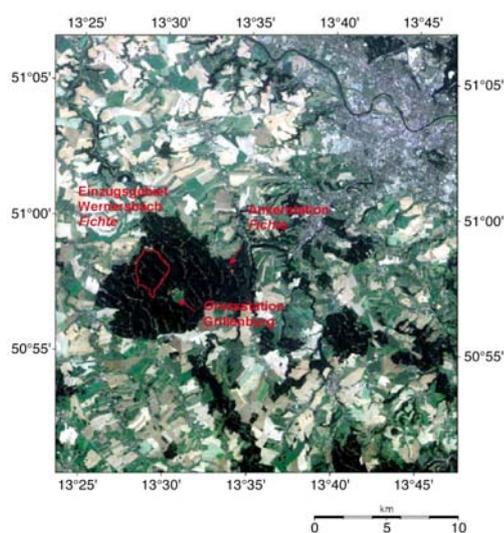


Abb. 3: Landnutzungsmosaik mit den wichtigsten Messstandorten im Tharandter Wald (Mitte links; NW Ecke zeigt Teile von Dresden; Bildanalyse durch Christian Podlasz basierend auf einer Landsat TM Aufnahme vom Sommer 1992).

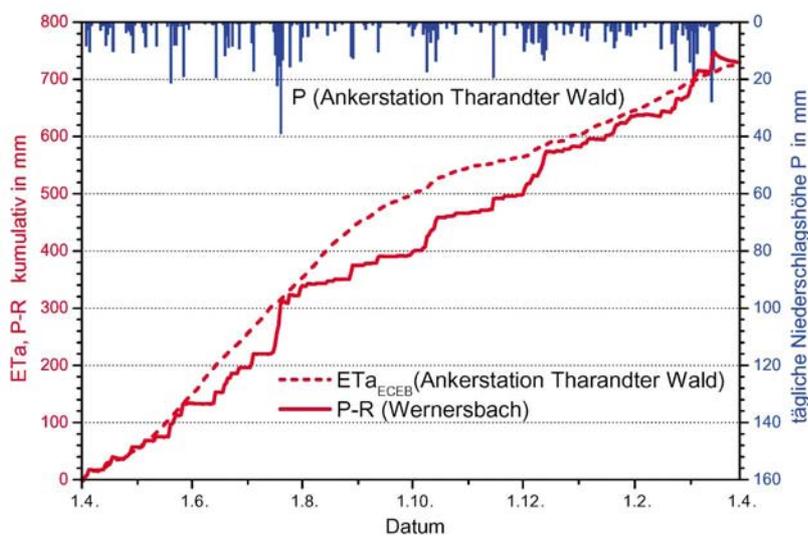


Abb. 4: Wasserhaushalt des Tharandter Waldes 1997: Kumulative Evapotranspiration aus hydrologischen Einzugsgebietsmessungen (P-R;  $\Delta S=0$ ) bzw. mikrometeorologischen Turmmessungen ( $ETa_{ECEB}$ ).

z.B. an der Ankerstation Tharandter Wald, in zwei Einzugsgebieten im Osterzgebirge und im Rahmen von Messkampagnen im Vordergrund. Es werden alle wesentlichen Landnutzungsformen betrachtet (Wälder, Grünland und Feldfrüchte). Wichtige Fragestellungen sind:

- Austausch von Impuls, Energie, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> und N-Spezies,
- Methode und Technik der Flussmessung,
- Wasser- und Kohlenstoffhaushalt von der Plot- bis zur Landschaftsebene,
- Einfluss der Heterogenität von Landschaften auf den Austausch mit der Atmosphäre,
- Regionalklima (Messnetze, biosphärische und wasserwirtschaftliche Aspekte).

An Werkzeugen stehen die umfangreichen Messungen im Erzgebirge zur Verfügung (Abb. 3), insbesondere die forstmeteorologischen Messungen am Wildacker (40-jährige Messreihe), die Wasserhaushaltsmessungen im Einzugsgebiet des Wernersbachs (35-jährige Messreihe) sowie die Ankerstationen Tharandter Wald (Flussmessungen über Fichte, mehr als zehnjährige Messreihe) und Grillenburg (Flussmessungen über Gras, seit 2002). Eine Einrichtung von Flussmessungen über landwirtschaftlichen Flächen ist für 2004 vorgesehen. Besonderes Augenmerk ist auf die Verknüpfung von Meteorologie, Hydrologie und Biologie gerichtet, um die Wirkungen der Landnutzung auf die wichtigen bio-geochemischen Kreisläufe besser zu verstehen (z.B. auf den Wasserkreislauf, Abb. 4). Die gewonnenen Daten dienen auch zur Parameterisierung von Modellen des Wasser- und Kohlenstoffhaushaltes (Regressionsmodelle, SVAT-Schemata). Die Biometeorologie wird seit 2001 durch die Einbindung von PD Dr. Barbara Köstner (wissenschaftliche Koordinatorin des Projekts VERTIKO) verstärkt; sie unterstützt auch die Arbeiten im Rahmen der Phänologie (Betreuung des IPG Tharandt/KO Hartha durch Heiko Prasse). Im Bereich Regionalklima ist die Verknüpfung zu den beiden anderen AGs der Professur besonders eng.

Die wichtigsten Projekte wurden und werden finanziert vom BMBF (Waldumbau Erzgebirge, AFO 2000 VERTIKO, FEM EMTAL), der EU (EUROFLUX, CarboEurope, TRACEFLUX) und der DFG (*Atmosphärische Rückkopplung,*

*Graduiertenkolleg Transportprozesse an den Kompartimentgrenzen zum Wasser*). Im Rahmen dieser Projekte wurden seit 1998 vier Promotionen abgeschlossen und es arbeiten derzeit 7 Doktoranden und 3 PostDocs.

### 3.2 Arbeitsgruppe „Fernerkundung und Wolkenprozesse“ (Franz H. Berger)

In der Arbeitsgruppe *Fernerkundung und Wolkenprozesse* steht die Beobachtung der Atmosphäre und der Landoberfläche mit Hilfe verschiedenster – insbesondere meteorologischer – Satellitendaten im Vordergrund. Die Schwerpunkte der Arbeitsgruppe lassen sich mit folgenden Teilaspekten darstellen:

- Charakterisierung von bio-geophysikalischen Landoberflächeneigenschaften (u.a. Reflexion, Blattflächenindex, Landnutzungsklassen) und deren räumliche und zeitliche Variabilität,
- Bestimmung der Strahlungs- und Energieflüsse am Erdboden und am Oberrand der Atmosphäre unter Berücksichtigung von optischen, geometrischen und mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften,
- Quantifizierung des Niederschlags aus passiven Satellitendaten,
- Einfluss der Wolken auf das Strahlungsfeld unter Berücksichtigung der vierdimensionalen Wolkenfeldstruktur.

Zur Bearbeitung der meteorologischen Satellitendaten (NOAA-AVHRR, Meteosat, MSG-SEVIRI, ERS/ATSR, und Envisat AATSR) steht das Auswerteverfahren SESAT (Strahlungs- und Energieflüsse aus Satellitendaten) zur Verfügung, um aus den spektralen Informationen optische, radiometrische und auch mikrophysikalische Wolkeneigenschaften abzuleiten. Diese werden wiederum genutzt, um in Folge daraus die Strahlungsflüsse am Erdboden im wolkenlosen, aber auch in bewölkten Atmosphären berechnen zu können (Abb. 5). In einem weiteren Modul von SESAT ist es möglich, die Energieflüsse in einer ersten Näherung abzuschätzen, wobei gegenwärtig klimatologische Ansätze Verwendung finden. Neben den meteorologischen Satellitendaten werden aber auch Daten von Erderkundungssatelliten, wie Landsat ETM oder AQUA/TERRA ASTER, genutzt, um räumlich höher aufgelöst Landoberflächeninformationen abzuleiten. Darunter gehören abermals die bio-

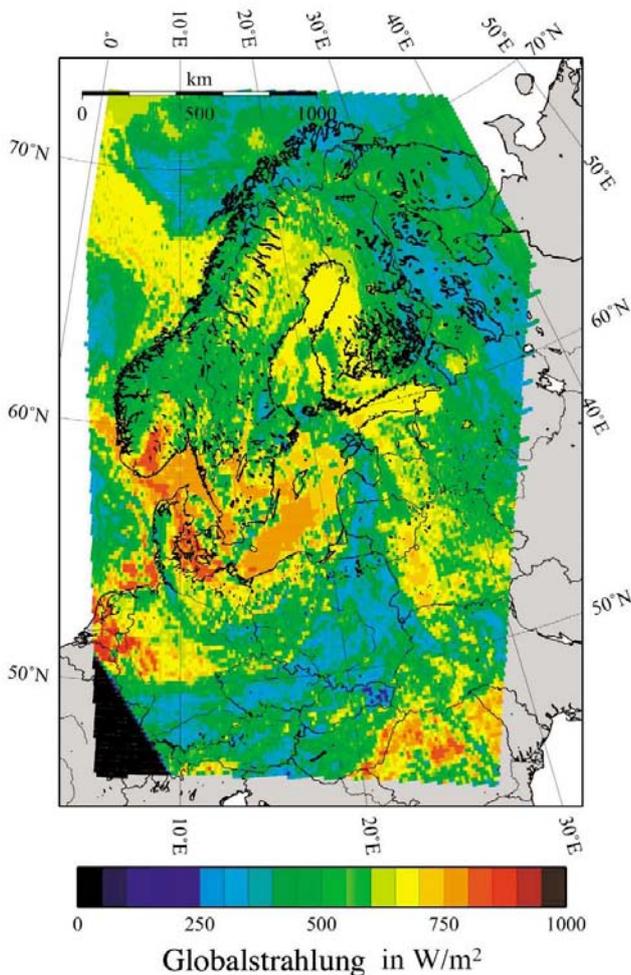
geophysikalischen Landoberflächeneigenschaften, aber auch die einzelnen Komponenten der Strahlungs- und Energiebilanz. Für Analysen des atmosphärischen Teils des Wasserkreislaufes können mit komplexen Methoden, mit IR/WV Techniken gekoppelt mit den Informationen über den Wolkenlebenszyklus, Meteosat Rapid Scan Daten und zukünftig auch MSG Daten bearbeitet werden, um daraus den Niederschlag zeitlich und räumlich hochaufgelöst zu bestimmen. Mit der Inbetriebnahme der MSG Empfangsanlage im Mai 2003 (Abb. 6) stehen der Professur Meteorologie auch zukünftig (bis etwa 2015) die MSG-SEVIRI Daten zur Verfügung, um diese in Echtzeit (in Kooperation mit dem Zentrum für Hochleistungsrechnen der TU Dresden) für verschiedene Anwendungszwecke bzw. Nutzer bearbeiten zu können. Ziel der letztgenannten Zusammenarbeit ist dabei eine effiziente Nutzung der Infrastruktur, sowie die Entwicklung innovativer Algorithmen und Methoden zur Echtzeitanalyse von Satellitendaten.

Die wichtigsten Projekte werden durch das BMBF (AFO2000 VERTIKO, AFO2000 4D-Wolken, DEKLIM QUIRCS und DEKLIM EVA-GRIPS), durch die Europäische Weltraumorganisation ESA und durch den Betreiber der Wettersatelliten Eumetsat gefördert. Im Rahmen dieser Projekte arbeiten zur Zeit 6 Doktoranden.

### 3.3 Arbeitsgruppe „Modellierung und Regionalklima“ (Valeri Goldberg)

In dieser Arbeitsgruppe steht die Modellierung von Prozessen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre für typische Landoberflächentypen in Mitteleuropa in der lokalen und regionalen Skala im Vordergrund. Dabei werden sowohl Aspekte der wechselseitigen Beeinflussung von Systemkomponenten als auch Effekte von Skalenübergängen auf die Energie- und Stoffflüsse betrachtet. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeitsgruppe befasst sich mit der Diagnose rezenter Klimavariabilität auf der regionalen Skala. Allgemeine Tätigkeitsfelder der Arbeitsgruppe sind:

- Klima von Vegetationsräumen unter Berücksichtigung der Rückkopplung mit der Atmosphäre,
- Regionalisierung von Klima-Kenngrößen durch Kopplung von Atmosphärenmodellen und GIS,



▲ Abb. 6: Kompositbild (VIS06, VIS08, IR120) der ersten an der Professur empfangenen und verarbeiteten MSG-SEVIRI Daten vom 9. Mai 2003 07:44 UTC.

◀ Abb. 5: Globalstrahlung am Erdboden, abgeleitet aus NOAA-AVHRR Daten, für den 15. Juni 1993 13:15 UTC.

- Einfluss der Heterogenität einer Landschaft auf die Variabilität meteorologischer Größen.

Als Modellwerkzeuge stehen das 1,5-dimensionale gekoppelte Vegetations-Grenzschichtmodell HIRVAC (**H**igh **R**esolution **V**egetation **A**tmosphere **C**oupler) und das Lokalmodell (Wettervorhersagemodell) des Deutschen Wetterdienstes in den horizontalen Auflösungen 2,8 km, 7 km und 14 km zur Verfügung. Mit dem Modell HIRVAC können alle relevanten Energiebilanzkomponenten, meteorologischen Standardelemente und Turbulenzparameter vertikal hochaufgelöst simuliert werden. Durch Koppelung des Grenzschichtmodells mit einem mechanistischen Photosynthesemodell (Universität Bayreuth) werden physiologisch basierte Parameter für den Austausch von Wasser und  $\text{CO}_2$  zwischen Vegetation und Atmosphäre für typische Landnutzungstypen in Mitteleuropa (Fichte, Kiefer, Buche, Gras, Raps, Getreide) berechnet. Die Übertragung der Punktsimulationen in die klein-

räumig strukturierte Fläche ist zentrale Aufgabe der Regionalisierung, wobei Atmosphärenmodell und GIS (Arcview und Arcinfo) durch dynamische Bibliotheken (dll) verknüpft werden (Abb. 7). Die Simulationen mit dem Lokalmodell dienen zum einen der Bereitstellung von Vergleichsdaten für Bodenmessung bzw. Satellitenfernerkundung und zum anderen der Untersuchung des Einflusses variabler und heterogener Landnutzung auf die Unsicherheit der Modellprognosen. Die regionale Klimadiagnose wurde in den letzten zwei Jahren für Sachsen durchgeführt, z. Zt. für Thüringen fortgesetzt und soll bald auf Sachsen-Anhalt ausgedehnt werden. Wichtigstes Werkzeug ist das Datenbanksystem MS Access, mit dessen Hilfe die regional spezifischen Klimadatenbanken unter Einbeziehung spezieller statistischer Auswerterroutinen zur Homogenisierung der Datenreihen installiert wurden (Abb. 8). Vor dem Hintergrund jüngster Witterungsextreme in Sachsen (Hochwasser 2002, Dürre 2003) besteht ein wachsendes öffentliches Inte-

resse an den Ergebnissen der Klimadiagnose. Mit der Arbeitsgruppe Modellierung und Regionalklima verbundene Projekte sind AFO2000 VERTIKO, DEKLIM EVA-GRIPS (BMBF), Atmosphärische Rückkoppelung (DFG), wobei hier enge Verschnidungen mit den anderen Arbeitsgruppen existieren, sowie CLISAX (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie) und REKLI (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie). Im Rahmen dieser Projekte arbeiten z. Zt. 4 Doktoranden (vgl. andere Arbeitsgruppen).

#### 4 Lehre

In der Lehre werden insgesamt sechs Studiengänge im Rahmen von Pflichtveranstaltungen betreut sowie zahlreiche weitere (z. B. die Geographie) durch Nebenfachvereinbarungen einbezogen. Das Lehrkontingent von bis zu 60 Semesterwochenstunden pro Studienjahr ist nur durch den Einsatz des gesamten wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Personals leistbar. In den Studiengängen Hydrologie, Geographie und Forstwissen-

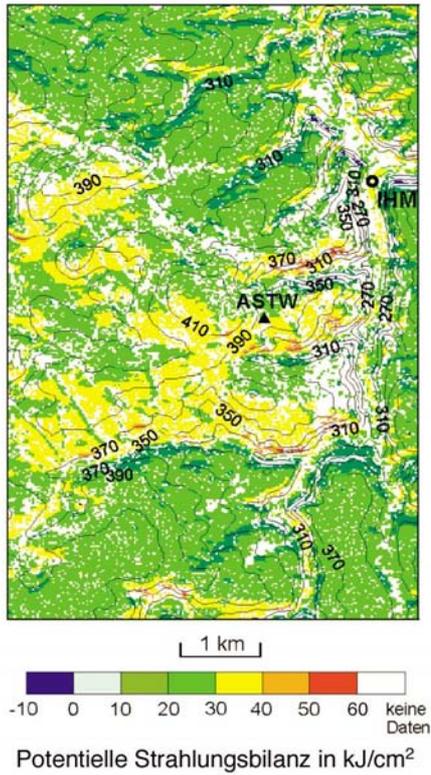


Abb. 7: Monatssumme der potentiellen Strahlungsbilanz für März im östlichen Tharandter Wald und im Weißeritzbogen (IHM-Tharandter Standort der Professur Meteorologie). Modellierung mit HIRGIS (GIS-Version von HIRVAC, Auflösung 25x25m<sup>2</sup>). Deutlich erkennbar sind die Unterschiede von Kahlschlägen bzw. Nordhängen (geringere Werte) und benachbarten Fichtenbeständen bzw. Südhängen (höhere Werte).

schaften werden Diplomarbeiten betreut, wobei das Schwergewicht auf den Diplomhydrologen liegt, deren Ausbildung in Dresden im Grundstudium dem Grundstudium der Meteorologie in Deutschland oder Österreich sehr ähnlich ist. Neben Vorlesungen werden umfangreiche Übungen und Praktika angeboten, darunter Feldpraktika, in denen die Studenten an die Ansprüche moderner Messmethodik unter wissenschaftlichen Bedingungen herangeführt werden (s. Tharandter Klimaprotokolle, Band 6, ISSN 1436-5235).

**5 Perspektiven**

Für die nächsten Jahre muss der Lehrstuhl mit der durch das Hochwasser bedingten Trennung in einen Dresdener und Tharandter Teil leben. Für 2005/6 ist die Fertigstellung neuer Räume in Tharandt vorgesehen, so dass vier Jahre (!) nach dem Hochwasser mit deutlich verbesser-

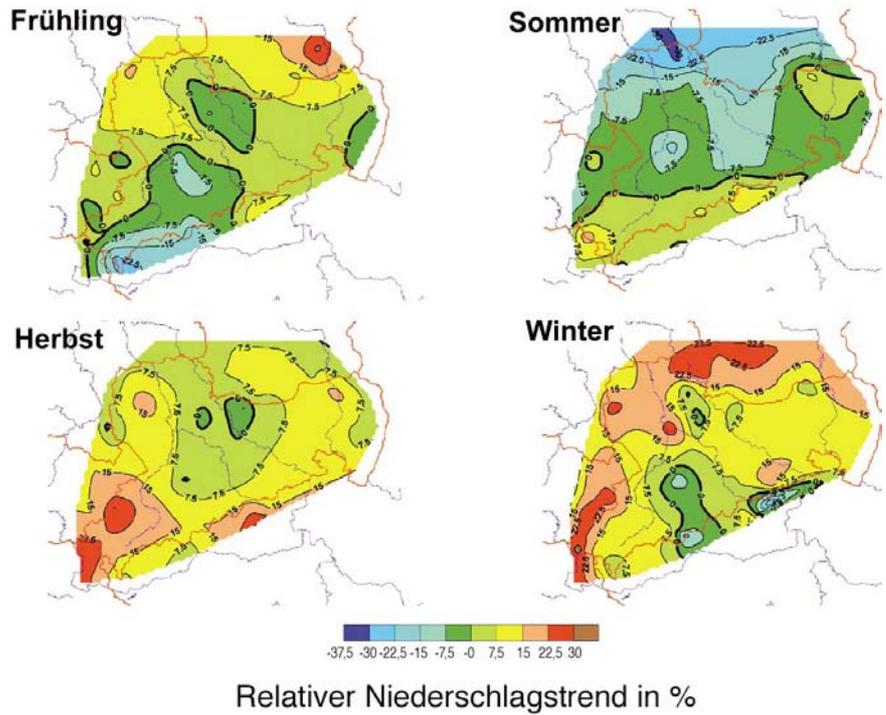


Abb. 8: Relativer Niederschlagstrend (%) im Zeitraum 1951-2000. Deutlich erkennbar ist der starke Rückgang in Nordsachsen im Sommer und die deutliche Zunahme in Nord- und Westsachsen im Winter. Der generell in Deutschland vorhandene positive Jahrestrend des Niederschlags ist in Sachsen nur schwach ausgeprägt.

ten Arbeitsbedingungen gerechnet werden kann. Es ist anzustreben, dass auch die verlorengegangenen Werkstätten in moderner Form wiedererstehen. Am Ende des ersten Jahres nach dem Hochwasser sind jedenfalls alle Messeinrichtungen wiederhergestellt, die Satellitenempfangsanlage moderner für MSG und das Messfeld in Tharandt erweitert um die Messung der potentiellen Verdunstung (Stand Herbst 2003). Und es fanden zwei sehr erfolgreiche Messkampagnen in Lindenberg und Tharandt statt, die für die laufenden Projekte den Rückstand aus dem Hochwasserjahr weitgehend wettgemacht haben.

Die zukünftigen Schwerpunkte sollen sich aus den vorhandenen organisch entwickeln, müssen aber auf die veränderten Rahmenbedingungen (Förderprogramme, Klimaentwicklung, Bachelor- und Masterausbildung) eingehen. Durch die Flut des August 2002 und die europaweite Dürre 2003 wurden die Niederschlagsextreme in den Vordergrund gerückt. Sie regional zu quantifizieren und zu prognostizieren wird eine der wesentlichen Herausforderungen der Meteorologie im ersten Jahrzehnt der 21. Jahrhunderts. Dafür sind

neben Modellen lange Datenreihen, die mit unterschiedlichsten Methoden gewonnen werden, unverzichtbar. Die Meteorologie der TU Dresden wird sich daher mit der Klimatologie der für Prozessverständnis und Modellierung von Landoberflächenprozessen (Niederschlag, Verdunstung, Stoffhaushalte) relevanten Daten und Parameter aus Boden- und Fernerkundungsinformationen beschäftigen. Neben der Kooperation in Europa und Deutschland sind diese Vorhaben eingebettet in das Kompetenzzentrum Wasser der TU Dresden (Gründung 2003) und das Dresden Flood Research Center (Gründung 2002).

**Anschrift des Autors:**

Prof. Dr. Christian Bernhofer  
 Institut für Hydrologie und Meteorologie  
 Technische Universität Dresden  
 01062 Dresden  
 Tel.: 035203/38-31340  
 Fax: 0351/463-39103  
 E-Mail: meteo@forst.tu-dresden.de

Das Institut im Internet:  
<http://www.forst.tu-dresden.de/ihm>

P. JANLE, G. SCHULZ

# Raum- und Zeitstruktur des Erdmagnetfeldes – ein Überblick

## 1 Einleitung

Über das Phänomen der magnetischen Wirkung von bestimmten Gesteinen wurde im griechischen Kulturkreis und in China schon einige Jahrhunderte v. Chr. berichtet. Es gibt Hinweise, dass den Chinesen schon im ersten Jahrhundert n. Chr. die Richtungseigenschaft des Erdmagnetfeldes bekannt war, magnetisierte Gesteine oder Metalle wurden vermutlich schon zur Navigation verwendet. Der griechischen und römischen Antike hingegen war die richtungweisende Kraft auf die magnetisierte Nadel entgangen. Erst Mitte des 14. Jahrhunderts wird der Gebrauch des Kompasses auf den Schiffen der British Navy als „Sailing needles and dial“ nachweislich erwähnt. Die erste umfassende Beschreibung der Erde als großem Magneten wurde im Jahre 1600 von William Gilbert, Leibarzt der englischen Königin Elizabeth I, verfaßt: *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure* (Abb. 1, aus BALMER 1956). Gilberts zentrale Aussage – *magnus magnes ipse est globus terrestris* (die Erde selbst ist ein großer Magnet) – ist der Ausgangspunkt für

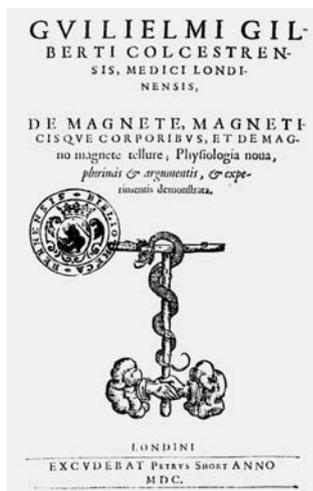


Abb. 1: Titelseite der Erstausgabe von: W. Gilberts „De Magnete“, 1600. Aus (BALMER 1956). Der Askulapstab weist darauf hin, dass Gilbert in erster Linie Mediziner war, nämlich der Leibarzt Königin Viktoria I.

alle modernen Vorstellungen über den Ursprungsort des Hauptfeldes. In der Zeit nach Gilbert wurde bald durch die Messung einzelner Komponenten erkannt, dass das Magnetfeld in hohem Maße zeitlich variabel ist. Bevor auf die Variationen und die Struktur des Feldes näher eingegangen wird, soll im zweiten Abschnitt die Darstellung des Erdmagnetfeldes mit seinen Komponenten beschrieben werden. Ziel dieser Darstellung ist es, die großen Zusammenhänge aufzuzeigen und neueste Entwicklungen vorzustellen. Wer das Thema weiter vertiefen möchte, dem sei das Fachbuch von MERRILL et al. (1996) empfohlen.

## 2 Beschreibung des Feldes

Ein in ihrem Schwerpunkt frei schwingende magnetisierte Nadel stellt sich in Richtung des lokalen magnetischen Feldverlaufs (genauer: Vektor der magnetischen Induktion  $\vec{B}$ ) ein. Die Komponenten – auch erdmagnetische Elemente genannt – werden in einem geographischen Koordinatensystem  $\mathbf{X}$  (nach Norden positiv),  $\mathbf{Y}$  (nach Osten positiv) und  $\mathbf{Z}$  (vertikal, auf der Nordhalbkugel nach unten positiv) wie folgt definiert (Abb. 2).  $\mathbf{F}$  ist

der Betrag der magnetischen Induktion und wird Totalintensität genannt.  $\mathbf{H}$  ist ihre Horizontalintensität, die sich als Resultierende der Komponenten  $\mathbf{X}$  und  $\mathbf{Y}$  ergibt. Sie bewirkt die richtunggebende Kraft bei der Verwendung von Kompassen, mit denen bekanntlich in Verbindung mit einer geodätischen Peilung der Winkel  $\mathbf{D}$  der Deklination (oder Missweisung) zwischen magnetisch und geographisch Nord (positiv bei östlicher Abweichung) gemessen wird. Die Inklination  $\mathbf{I}$  ist der Winkel zwischen der Horizontalebene und dem Vektor  $\mathbf{B}$ , auf der Nordhalbkugel nach unten positiv. Die in Abb. 2 angedeuteten Größenordnungen der Elemente entsprechen einem Ort in gemäßigter nördlicher Breite.

Die magnetische Induktion wird in der SI-Einheit T (Tesla) angegeben. Da das Erdmagnetfeld im Gegensatz zu technischen Feldern schwach (jedoch sehr homogen) ist, benutzt man in der Regel die Untereinheit nT (1 Nanotesla =  $10^{-9}$ T). Ergänzend sei bemerkt, dass  $\mathbf{B}$  über die Induktionskonstante  $\mu_0$  mit der magnetischen Feldstärke  $\mathbf{H}$  (nicht zu verwechseln mit der gleichbenannten Horizontalintensität des Erdmagnetfeldes) verknüpft

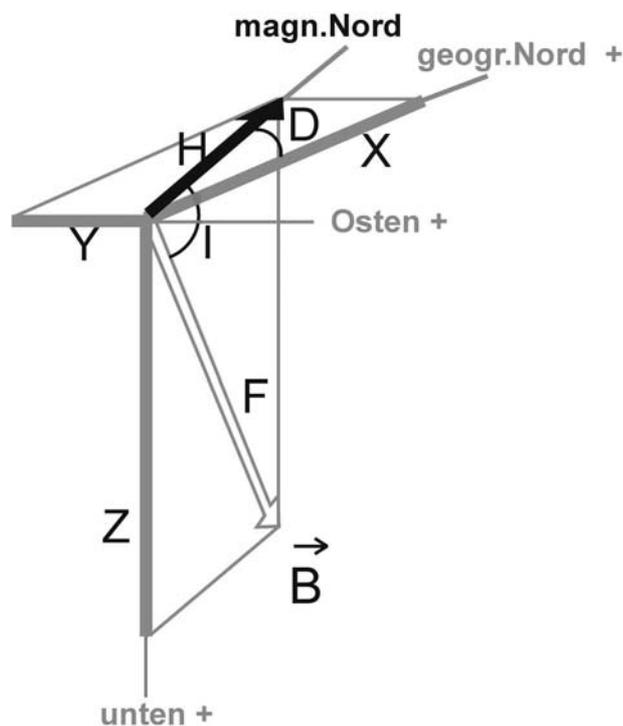


Abb. 2: Elemente des erdmagnetischen Feldes (Vektor der Induktion  $\vec{B}$ ), dargestellt für den Fall gemäßigter nördlicher Breiten. Die beiden Intensitäten  $\mathbf{H}$  (horizontal) und  $\mathbf{F}$  (total) ergeben sich als Resultierende aus den geographischen Komponenten  $\mathbf{X}$  und  $\mathbf{Y}$  bzw.  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}$  und  $\mathbf{Z}$  der Induktion  $\mathbf{B}$ .  $\mathbf{X}$  zählt nach Norden,  $\mathbf{Y}$  nach Osten und  $\mathbf{Z}$  nach unten positiv. Die Deklination  $\mathbf{D}$  ist als Winkel zwischen  $\mathbf{H}$  und  $\mathbf{X}$  definiert und zählt wie  $\mathbf{Y}$  nach Osten positiv. Die Inklination  $\mathbf{I}$  ist der Winkel zwischen dem Vektor  $\mathbf{B}$  und der Horizontalen.

ist. Es gilt  $B = \mu_0 H$ . Berechnet wird die Feldstärke in  $\text{Am}^{-1}$ . Die Permeabilität  $\mu$  des freien Raumes ist in guter Näherung gleich 1. Danach entspricht eine gemessene Induktion von  $10^5 \text{ nT}$  etwa der magnetischen Feldstärke von  $80 \text{ Am}^{-1}$ .

Einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften des Erdmagnetfeldes gibt Abb. 3. An der Erdoberfläche verhält sich das Feld in erster Näherung wie das eines magnetischen Dipols, dessen Durchstoßungspunkte an der Erdoberfläche im Norden B (borealer Magnetpol, geomagnetischer Nordpol) und A im Süden (australer Magnetpol, geomagnetischer Südpol) nach physikalischer Definition magnetische Süd- bzw. Nordpole sind. Der Dipol ist um  $11,5^\circ$  gegenüber der Rotationsachse geneigt und im Falle einer noch besseren Näherung als exzentrischer Dipol zur Zeit um etwa 350 km gegenüber dem Erdmittelpunkt versetzt. Zu unterscheiden davon sind die Orte, an denen das Magnetfeld senkrecht einfällt (Inklination =  $90^\circ$ ), die also nur messend bestimmt werden können. Sie werden nach dem angelsächsischen Sprachgebrauch treffend als **Dip-Pole** bezeichnet. Am arktischen (nördlichen) Dip-Pol  $P_2$  (physikalisch ein Südpol) treten die Feldlinien in den Erdkörper ein und am antarktischen (südlichen) Dip-Pol  $P_1$  (physikalisch ein Nordpol) aus. Die ge-

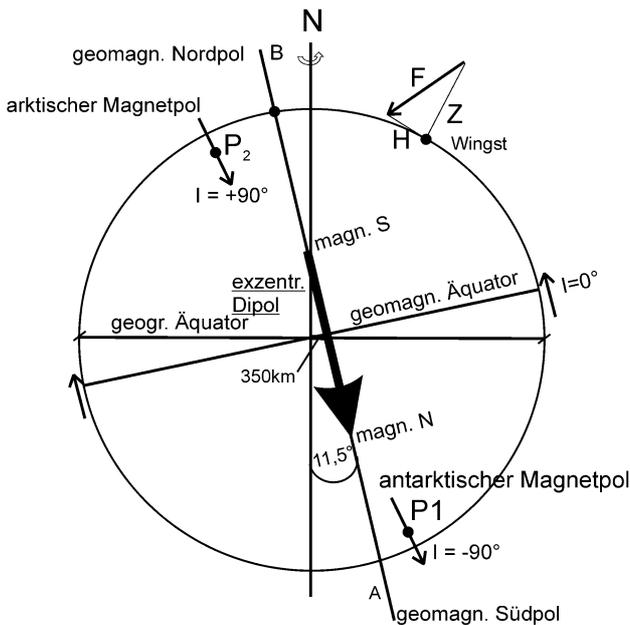


Abb. 3: Schematische Darstellung des erdmagnetischen Feldes. Wesentliche Merkmale: (1) Da sich ungleichnamige Pole zweier Magnete anziehen, wendet jede Kompaßnadel ihren eigenen Nordpol dem Südpol des Erdmagnetfeldes zu. Daher liegt – als Folge der Definition des Nordpols der Nadel – der physikalische Südpol der Erde in der Nähe des geographischen Nordpols und umgekehrt. (2) Die geomagnetischen Pole (A, B) ergeben sich als Durchstoßpunkte eines rechnerisch optimal angepaßten Dipols und spannen (im Fall des zentrischen Dipols) mit dem geomagnetischen Äquator das geomagnetische Koordinatensystem auf. Die Lage des arktischen ( $P_2$ ) und antarktischen Magnetpols ( $P_1$ ) – auch Dip-Pole genannt – können dagegen nur durch Messung gefunden werden. (3) Dem Modell eines Dipols entsprechend, ist der Betrag der magnetischen Induktion am Äquator nur halb so groß wie die an den Polen. Am Äquator verschwindet die Vertikal-, an den Polen die Horizontalkomponente.

messene Inklination verschwindet im Bereich des magnetischen Äquators, der vom geomagnetischen Äquator (definiert über das Dipolmodell) abweicht. Entsprechend dem Modell ist dort im Vergleich zu den Polen nur noch die halbe Intensität zu erwarten (siehe auch Tab. 1).

Das Magnetfeld, gemessen an der Erdoberfläche, kann nach seinen Ursprüngen im wesentlichen in vier Anteile gegliedert werden.

1. Das **Hauptfeld** mit einer relativ geringen, aber langzeitlichen Änderung (Säkularvariation); Ursprung im Erdinneren, d. h. im Erdkern. Teil des Innenfeldes.
2. Das **Außenfeld** (Variationsfeld) Bruchteil des Hauptfeldes; ändert sich relativ rasch (teils zyklisch, teils zufällig); Ursprung außerhalb der festen Erde (Sonnenwind wirkt auf die Magnetosphäre).
3. Das **Anomalienfeld** (Krustenfeld) meist viel kleiner als das Hauptfeld, zeitlich nahezu konstant; Ursprung in der oberen Erdkruste (remanente Magnetisierung, Erzlagerstätten). Teil des Innenfeldes.
4. Das vom Variationsfeld **induzierte Feld**; Anteile haben ihre Quellen im elektrisch leitfähigen Untergrund. Die Amplituden (vor allem in Z) können von gleicher Größenordnung sein wie die induzierenden Variationen selbst. Teil des Innenfeldes.

Das *Hauptfeld* bildet den weitaus größten Anteil und wird von den anderen Komponenten lediglich moduliert. *Außenfeld* und *induziertes Feld* können – je nach Störungsgrad – bis zu mehreren Prozent des Hauptfeldes betragen, das *Krustenfeld* ebenfalls. In Ausnahmen erreicht das letztere dieselbe Größenordnung wie das Hauptfeld selbst. So zeigen z.B. die Kursker magnetische Anomalie mit F bis zu  $190000 \text{ nT}$  und der Erzberg Kiruna mit F bis zu  $70000 \text{ nT}$  extreme Werte. Beide Extrema sind in Abb. 4 (aus MAUS et al. 2002) zu erkennen. Die Abbildung zeigt das lithosphärische Krustenmodell aus globaler Sicht mit dem Euro-

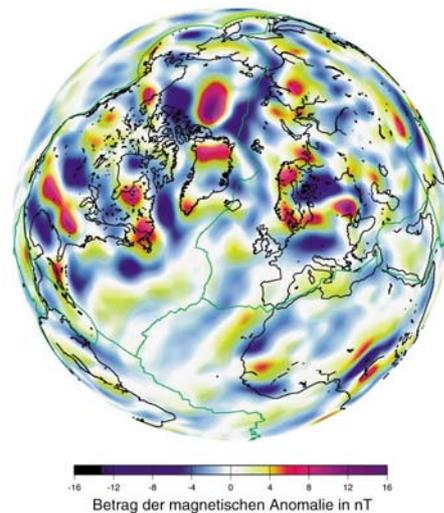


Abb. 4: Krustenfeld (CHAMP-Daten, aus MAUS et al. 2002), globaler Blick auf die Nordhalbkugel mit Island und dem Reykjanes-Rücken im Zentrum (siehe Abb. 15). Besonders starke Anomalien befinden sich im Bereich des Nordpolarmeeres und auf den angrenzenden Kontinentalblöcken. (Der Kugelfunktionsanalyse liegen Terme 14. bis 65. Grades bzw. Ordnung zugrunde.).

päischen Nordmeer im Zentrum. Die Darstellung ist das Ergebnis einer Analyse der ersten 382 Tage der CHAMP-Mission (**C**hallenging **M**ini **S**atellite **P**ayload). Zu beachten ist, dass wegen der Flughöhe die Amplituden der Anomalien stark gedämpft und die Auflösung der Strukturen begrenzt ist. Mögliche großräumige Krustenstrukturen, etwa von kontinentalem Ausmaß, sind nicht dargestellt, da das Spektrum auf Terme begrenzt ist, die nicht vom Hauptfeld überdeckt sind.

Wir beschränken uns im folgenden auf die ersten drei oben genannten Anteile, beginnen mit einigen einführenden Bemerkungen zur messenden Bestimmung des Erdmagnetfeldes über das weltweite Netz erdmagnetischer Observatorien sowie mit Hilfe moderner Satellitentechnik, behandeln anschließend das Hauptfeld mit seinen Säkularvariationen und darauf das Spektrum des externen Variationsfeldes und schließen mit einem Abschnitt über Paläomagnetismus und Plattentektonik, welcher sowohl Aspekte der Säkularvariation als auch des Krustenfeldes beleuchtet

### 3 Erdmagnetische Observatorien und Satellitenmissionen

Bereits ab 1836 nutzten GAUß und WEBER ein erstes Netz von Observatorien mit terminlicher Absprache für zeitgleiche Beobachtungen, um dem Phänomen Erdmagnetismus auf den Grund zu kommen. Hierzu gründeten sie – mit Unterstützung von Alexander von Humboldt – den Göttinger Magnetischen Verein, übrigens die erste internationale wissenschaftliche Gesellschaft überhaupt. Innerhalb der anschließenden fünf Jahre beteiligten sich weltweit bis zu 50 Observatorien, 35 allein in Europa (MICHLING 1976), von denen heute allerdings keines mehr registriert. Das liegt in der Regel an der zivilisatorischen Entwicklung des Umfeldes: Straßenbau, Industrieansiedlung, usw. bilden dann das Aus eines mehr oder weniger langen Beobachtungszeitraumes. Gute Observatorien sind daher heute stadtfremd angelegt und meistens zusätzlich durch (gesetzlich verankerte) Schutzkreise abgeschirmt.

Der qualitative Anspruch moderner Observatorien ist also sehr hoch, denn Aufgabe ist es, das gesamte Spektrum der zeitlichen Variationen von Perioden im Sekunden-Bereich bis zur Säkularvariation über Jahrzehnte mit einem Dynamikbereich von mehreren Zehnerpotenzen zu erfassen und das mit einem erheblichen Anspruch an die Stabilität der absoluten Meßgeräte und die Kontinuität der Registrierung. Um zusätzlich einen schnellen Datenaustausch zu ermöglichen, wurde 1987 das Projekt INTERMAGNET (Global near-real-time magnetic observatory network) etabliert. Mittlerweile sind 91 Stationen (etwa 40 % aller Observatorien weltweit) aus 38 Ländern beteiligt. Damit werden deren Daten über Satelliten- und Computer-Links zusammengeführt und so zentral zugänglich gemacht (Abb. 5). Für den europäischen Raum wird METEOSAT in Anspruch genommen. Da die kurzfristigen Schwankungen des Erdmagnetfeldes Rückschlüsse auf den elektrischen Zustand der höheren Atmosphäre zulassen (Abschnitt 5), handelt es sich hier um Wetter-relevante Daten.

Unbefriedigend ist die Abweichung der Observatorien von einer Gleichverteilung. Hier setzen die Vorteile der Satelliten-Kartierung ein. Allerdings operieren Satelliten in einem Bereich, wo das Erdmagnetfeld nicht wirbelfrei ist. Ionosphäre und Magnetosphäre sind wegen ihrer elektrischen Leitfähigkeit Sitz von Stromsystemen,

deren Ausdehnung und Intensität zeitlichen Schwankungen unterliegen (Abschnitt 5). Die Trennung ihres Einflusses gestaltet sich schwierig. Daher ist eine Kartierung des Innenfeldes bisher nur während bestimmter Zeitfenster durchgeführt worden.

Beide Konzepte ergänzen sich also: Die Observatorien liefern zuverlässige Zeitreihen an festen Orten und bilden die absolute Referenz für Satellitenmessungen; Satellitenmissionen geben prinzipiell nur Momentaufnahmen der überflogenen Bereiche, schließen damit aber die Lücken zwischen den Observatorien, polare Bahnen (hohe Inklination) für eine möglichst große Überdeckung vorausgesetzt.

Die Reduktion auf eine bestimmte Epoche bei der Bearbeitung von Weltkarten wie die World Magnetic Charts des USGS (**U.S. Geological Survey**, <http://geomag.usgs.gov/chartsdo.html>) und BGS (**British Geological Survey**) oder die Weltmodelle der IGRF-Serie (**I**nternational **G**eomagnetic **R**eference **F**ield), durch IAGA-Gremien (**I**nternational **A**ssociation of **G**eomagnetism and **A**eronomy) festgelegt, beruht nach wie vor hauptsächlich auf dem Datensatz der Observatorien und Messungen an ausgewählten ortsfesten (Säkular-)Punkten. Beide Modelle berücksichtigen noch Terme der Ordnung und des Grades 12 für das Hauptfeld, 8 für die Säkularvariation.

Die folgenden Satelliten mit niedrigen Umlaufbahnen sind/waren bisher für die Kartierung des Erdmagnetismus relevant:

POGO	<b>P</b> olar <b>O</b> rbiting <b>G</b> eophysical <b>O</b> bservatories, 1965 bis 1971,
MAGSAT	NASA, 1979 bis 1980,
Oersted	Danish Meteorological Institute, ab 1999,
CHAMP	<b>C</b> hallenging <b>M</b> ini <b>S</b> atellite <b>P</b> ayload, GeoForschungsZentrum Potsdam, ab 2001.

Während die vier POGO-Satelliten mit skalaren Magnetometern bestückt waren, hatten/haben die nachfolgenden Vektormagnetometer an Bord.

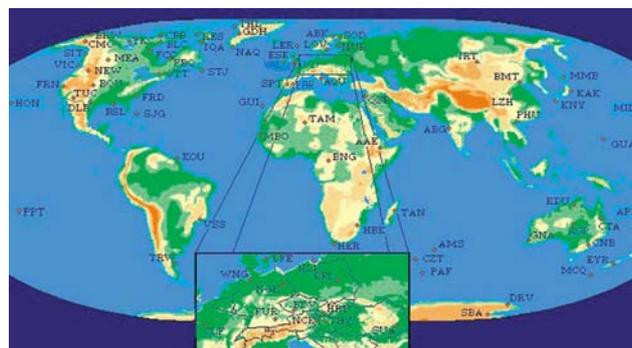


Abb. 5: Verteilung der erdmagnetischen Observatorien (Stand 2001), die in das INTERMAGNET-Netzwerk eingebunden sind und somit zentral Daten online zur Verfügung stellen. Hinzu kommen noch etwa 140 Stationen, die dem Verbund (noch) nicht angehören. Der Austausch der Beobachtungen findet hier über Welt Datenzentren statt. Da Stationen mit dem geforderten Standard nur an Land betrieben werden können, ergibt sich die für globale Analysen recht ungünstige Verteilung. Gauß' und Webers Initiative wirkt noch heute in der Dichte des Netzes auf dem europäischen Kontinent nach.

### 4 Hauptfeld und Säkularvariation

Abb. 6 zeigt die neueste Ausgabe der World Magnetic Chart der Totalintensität des Hauptfeldes für die Epoche 2000 (<http://geomag.usgs.gov/dod.html>). Neben den beiden Maxima im Bereich des kanadischen Archipels und vor der Küste der Antarktis tritt ein weiteres Maximum mit vergleichbarer Amplitude über Zentralasien in Erscheinung, sowie ein deutliches Minimum über Südamerika. Diese Strukturen weisen auf nicht unbeträchtliche Abweichungen vom Dipolfeld hin (Restfeld). Der arktische Dip-Pol befinden sich zur Zeit nördlich des kanadischen Archipels (Abschnitt 4.2) und ist nach Abb. 6 offensichtlich kein Punkt maximaler Intensität. Die Orte der Dip-Pole sowie die Beträge des Hauptfeldes an den Dip-Polen und am magnetischen Äquator sind in der Tab. 1 zusammengefaßt.

Elemente des Hauptfeldes			
Element	an den magnetischen Dip-Polen		am Äquator
	Nord	Süd	
	2001: 81° 18' N 110° 48' W	2000: 64° 40' S 138° 20' W	
I	90°	-90°	0°
H	0 nT	0 nT	26000 – 41000 nT
Z	58000 nT	68000 nT	0 nT
F	58000 nT	68000 nT	26000 – 41000 nT

Tab. 1: Orte der Dip-Pole sowie die Beträge des Hauptfeldes an den Dip-Polen und am magnetischen Äquator.

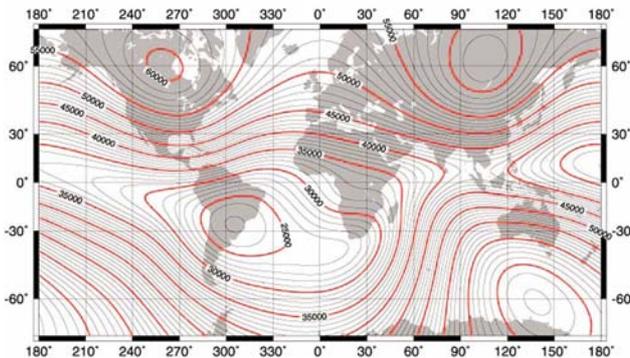


Abb. 6: World Magnetic Chart der Totalintensität F für die Epoche 2000 (Quelle siehe Text). Die in Abb. 3 notierten Merkmale sind durch das Restfeld zum Teil überdeckt. Deutlich ist jedoch die Zunahme der Totalintensität vom Äquator zu den Polen bis zum doppelten Betrag. Isolinien in nT, Abstand der Isolinien in 1000 nT.

#### 4.1 Entstehung des Hauptfeldes

Wie im Abschnitt 1 erwähnt, wird der Ursprung des Hauptfeldes heute innerhalb der Erde gesehen. Die Kruste als denkbarer Sitz der Quelle scheidet aus, da die erforderliche Magnetisierung der Gesteine bei einigen  $10^3 \text{ Am}^{-1}$  liegen müßte, einem Wert, der alle vernünftigen Grenzen erheblich übersteigt. Auch der Mantel kommt nicht in Frage, da die Curie-Temperatur (siehe Abschnitt 6) bereits in einigen 10 km Tiefe überschritten wird. Bleibt der Erdkern als Sitz der Quelle.

Eine Theorie über die Entstehung des Magnetfeldes muß mehreren Beobachtungen genügen, von denen hier die wichtigsten genannt werden:

1. Das Feld muß einen Dipolcharakter haben,
2. Die Feldstärke sollte mit der Rotationsgeschwindigkeit des Himmelskörpers wachsen,
3. Die Dipolachse muß im zeitlichen Mittel mit der Rotationsachse zusammenfallen,
4. Der Mechanismus muß zeitliche Intensitäts- und Richtungsschwankungen des Erdfeldes zulassen,
5. Die Säkularvariationen, d. h. langzeitliche Änderungen (siehe Abschnitt 4.2) müssen erklärt werden (u. a. die Westwärtsdrift),
6. Es müssen Feldumpolungen mit zeitlich statistischem Charakter möglich sein. Die Zeitspanne zwischen zwei Umpolungen beträgt im Mittel etwa 200.000 Jahre,
7. Gemäß der Größe und der elektrischen Leitfähigkeit des Erdkerns würde das Magnetfeld in etwa 20 000 Jahren zerfallen, wenn es nicht kontinuierlich neu erzeugt werden würde. Die Temperatur des Kerns ist zu hoch, um permanenten Magnetismus zu erhalten.

Aus den Beobachtungen geht hervor, dass das Magnetfeld kontinuierlich neu erzeugt werden muß und bei weitem nicht statisch ist. Deshalb kann der Ursprung nur im flüssigen äußeren Kern gesucht werden. Seismische Daten haben Anfang des letzten Jahrhunderts gezeigt, dass der äußere Eisenkern quasi-flüssig ist. Dagegen ist der innere Kern fest.

M. ELSÄSSER und E.C. BULLARD erklärten Mitte der fünfziger Jahre des vorigen Jahrhunderts das Magnetfeld mit magneto-hydrodynamischen Prozessen im flüssigen äußeren Erdkern (Abb. 7). Dabei wirken Konvektionsströmungen der elektrisch leitenden Flüssigkeit wie ein Dynamo.

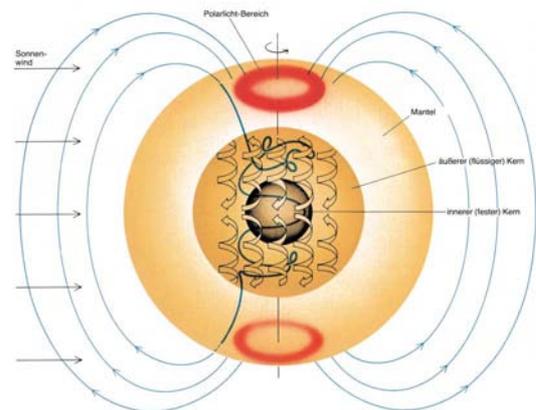


Abb. 7: Das Magnetfeld der Erde wird durch einen Dynamo im Erdkern immer wieder neu erzeugt. Dabei spielen nach neuen magneto-hydrodynamischen Theorien schraubenartige Konvektionsströmungen im flüssigen Kern eine Schlüsselrolle. Da das Kernmaterial elektrisch leitend ist, sollten diese Strömungen das Magnetfeld im Kern durch Induktion immer wieder erneuern, indem sie die Feldlinien um die Erdachse wickeln (hier ist eine solche Feldlinie eingezeichnet) (von JEANLOZ 1983). Anmerkung der Autoren: Der Verlauf der Feldlinien ist nur schematisch zu verstehen. So dringt der Sonnenwind im Extremfall höchstens bis auf einige Erdradien vor.

Es stellt sich die Frage, wie die Energie bzw. Wärme bereit gestellt wird, um die Konvektionen über mehrere Milliarden Jahre aufrecht zu erhalten, d. h. um den magnetohydrodynamischen Dynamo in Betrieb zu halten. Als eine Wärmequelle wurde lange das radioaktive Isotop Kalium-40 angenommen. Neuere geochemische Modelle zeigen aber, dass die Menge wohl nicht ausreicht. Heute wird als Hauptquelle das Ausfrieren des inneren Kerns angesehen. Die Erde kühlt langsam ab; an der Grenze flüssiger äußerer/fester innerer Kern verfestigt sich die Schmelze. Dabei wird latente Wärme freigegeben und leichte Anteile der Schmelze bleiben zurück. So ergeben sich zwei Komponenten für die Konvektion: (1) Die Wärme treibt die Konvektion an; (2) die leichtere Restschmelze erhält einen Auftrieb.

Durch die Erdrotation greifen Corioliskräfte auf die aufsteigende Flüssigkeit und verformen die Strömung schraubenförmig. Das Ergebnis ist die Anordnung von achsenparallelen Zylindern, sogenannte Taylorsäulen wie in Abb. 7 schematisch dargestellt. Die schraubenförmige Bewegung dreht und schert das Magnetfeld, wodurch ein neues Magnetfeld entsteht, um dasjenige zu ersetzen welches wegdiffundiert. Der unregelmäßige Verlauf einer Magnetfeldlinie ist in Abb. 7 angedeutet. Die zugrundeliegende magnetohydrodynamische Theorie ist äußerst komplex und kann hier nicht weiter erörtert werden. Führend bei der Ausarbeitung der Theorie und ihrer Umsetzung in numerische Modelle sind Glatzmaier und Roberts (1995, 1996). Sie entwickelten ein 3D magnetohydrodynamisches Modell, das u. a. die Feldumkehr und die Westwärtsdrift (Abschnitt 4.2) der nichtdipolaren Feldanteile simulieren kann (Glatzmaier-Roberts-Modell (1997), siehe: <http://www.igpp.lanl.gov/Geodynamo.html>).

Abb. 8 zeigt in einer Simulation die Magnetfeldlinien während einer Feldumkehr (entnommen obiger Webseite). Zum einen wird deutlich der Dipolcharakter des Feldes vor und nach der Umkehr und der sehr komplexe Verlauf der Magnetfeldlinien. Zum anderen verschwindet niemals das Magnetfeld wie manchmal in Pressemeldungen befürchtet. Im mittleren Stadium der Umkehr verstärken sich Multipolkomponenten.

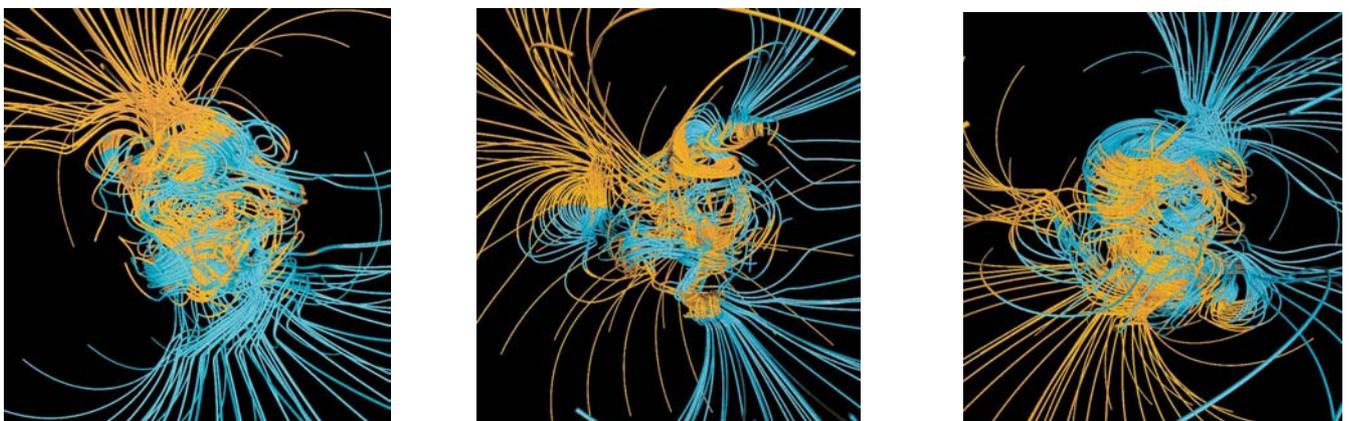


Abb. 8: Schnappschüsse der 3D magnetischen Feldstruktur, die mit dem Glatzmaier-Roberts-Modell simuliert wurden. Magnetische Feldlinien sind blau, wo das Feld nach Innen gerichtet ist, und gelb, wo es nach Außen gerichtet ist. Ein Übergang tritt an der Kern/Mantelgrenze auf von der komplizierten Feldstruktur im flüssigen Kern, wo das Feld erzeugt wird, zur glatteren Feldstruktur außerhalb des Kerns.

Die linke Abbildung zeigt das Feld 500 Jahre vor der Feldumkehr mit einem ausgeprägten Dipolcharakter; bei der mittleren Abbildung befindet sich das Feld mitten in der Umkehr, Multipole treten verstärkt auf; in der rechten Abbildung, 500 Jahre nach der Feldumkehr, hat sich der Dipol regeneriert (von GLATZMAIER und ROBERTS 1995).

Die Konvektion im äußeren Kern strebt danach das Feld umzukehren. Der feste innere Kern verhindert jedoch häufige Umkehrungen, da seine Magnetisierung eine viel größere Zeitskala für die Diffusion des Feldes aufweist. Es gibt deshalb viele Ansätze zur Feldumkehr, die in der Paläomagnetik auch Exkursionen genannt werden. Da es dabei nur selten zu einer Feldumkehr kommt, kann aus der gegenwärtigen Feldabnahme nicht auf eine bevorstehende Umkehr geschlossen werden.

## 4.2 Säkularvariation

### Westwärtsdrift

Einige weitere Besonderheiten weist die Modellierung des Kernmodells (Abschnitt 4.1) auf. Ein Beispiel dafür ist die Westwärtsdrift der nicht-dipolaren Feldstrukturen. Verantwortlich für dieses zeitabhängige Feldverhalten ist der Einfluss der Erdrotation auf die Konvektion im flüssigen äußeren Kern. Aufsteigendes Material im rotierenden, flüssigen äußeren Kern wird relativ verlangsamt. Dieses führt zu einer kleineren Relativgeschwindigkeit zum festen Mantel und der Erdoberfläche. Wirbel im äußeren flüssigen Kern erzeugen nicht-dipolare Feldstrukturen, die gegenüber der Erdoberfläche mit  $0,2^\circ/\text{Jahr}$  zurückbleiben. Diese Westwärtsdrift wird schon lange durch Beobachtungsdaten in den erdmagnetischen Observatorien belegt. Weiterhin ergibt sich aus den Modellierungen, dass der feste innere Kern  $2^\circ$  bis  $3^\circ$  pro Jahr schneller rotieren sollte als der Mantel (Superrotation des inneren Kerns). Hinweise dafür ergeben sich aus seismologischen Beobachtungen (SONG und RICHARDS 1996).

### Abnahme des Dipolmoments

Ebenso wie bei der Darstellung des Krustenfeldes in Abb. 4 wurden die ersten verfügbaren CHAMP-Daten mit dem entsprechenden Satz der MAGSAT-Mission zu einer Darstellung der globalen Verteilung der Säkularvariation der Totalintensität im Sinne CHAMP minus MAGSAT genutzt (GFZ Potsdam 2002). Aus Abb. 9 kann man entnehmen, dass wesentliche Änderungen im Sinne einer Abnahme des Feldes dominieren, und zwar im Bereich

der Karibik und im südlichen Atlantik bis zu 10 %. Dort ist mit einem erhöhten Einfall des Sonnenwindes zu rechnen. Die Folgen für die Menschen sowie die Tier- und Pflanzenwelt sind noch nicht voll abzusehen. Als mögliche Folgen wären zu nennen, dass der Vogelzug im Frühjahr und Herbst, der sich u.a. an der Ausrichtung des Magnetfeldes orientiert, beeinträchtigt werden könnte. Ähnliches gilt für die marinen Lebewesen, die sich auch an dem Magnetfeld orientieren. Als weitere Änderung ist noch zu nennen, dass die Gebiete mit Polarlicht sich räumlich verlagern werden.

Dieses Ergebnis geht mit der beobachteten Abnahme des **Dipolmoments** der Erde konform. Die in Abb. 10 gezeigten ersten Werte der Momente gehen auf Gauß zurück. Mit der Entwicklung eines Verfahrens zur absoluten Messungen der erdmagnetischen Elemente und der Kugelfunktionsanalyse schuf er die Voraussetzungen für die Bestimmung der Momente. In den letzten Jahren zeichnet sich eine dramatische Entwicklung ab. Es ist eine Frage der Extrapolation, wann danach das Dipolfeld minimal wird.

*Wanderung der Dip-Pole*

Recht zutreffende Angaben über den Ort des arktischen Dip-Pols gehen bereits auf Gerardus Mercator zurück. Er vermutete den Pol bereits über ein halbes Jahrhundert vor Gilberts epochaler Veröffentlichung nach eigenen Berechnungen bei 79°N westlich der Beringstraße. Er kam damit der wahren Lage (Tab. 1) also erstaunlich nahe. Obwohl Lage und Wanderung der Dip-Pole aus geophysikalischer Sicht keine Sonderstellung zukommt – deren Wanderungsgeschwindigkeit ist eben auch „nur“ ein Aspekt der Säkularvariation –, sind sie aus kartographischer und navigatorischer Sicht recht bedeutend. Auch kulturgeschichtlich haben die Magnetpole einen hohen Stellenwert: Fragen nach dem Phänomen Erdmagnetismus implizieren meistens die Frage nach dem (derzeitigen) Sitz der Magnetpole.

James Clark ROSS (1834) war der erste, der den Sitz des arktischen Dip-Pols 1831 im kanadischen Archipel an der Westküste von Boothia Peninsula durch Messung der Inklination ausfindig machte. Die Halbinsel trägt übrigens den Namen des Sponsors

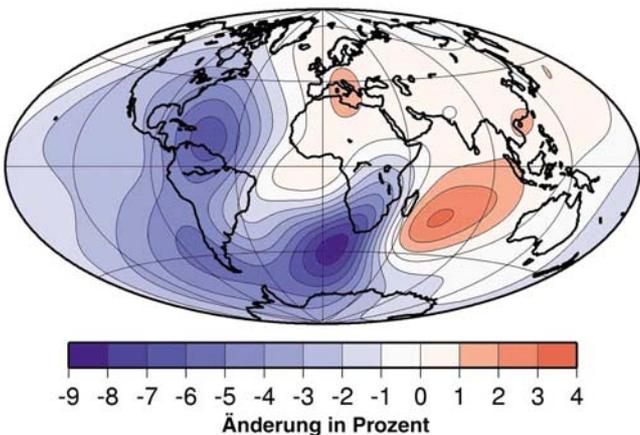


Abb. 9: Globale Verteilung der Säkularvariation (aus GFZ 2002), dargestellt durch die Differenzbildung zweier „Momentaufnahmen“, gewonnen aus MAGSAT-Daten 1980 und CHAMP-Daten 2001. Im Schnitt überwiegt die Abnahme der Totalintensität, wie nach Abb. 10 (zeitlicher Verlauf des Dipolmoments) zu erwarten ist.

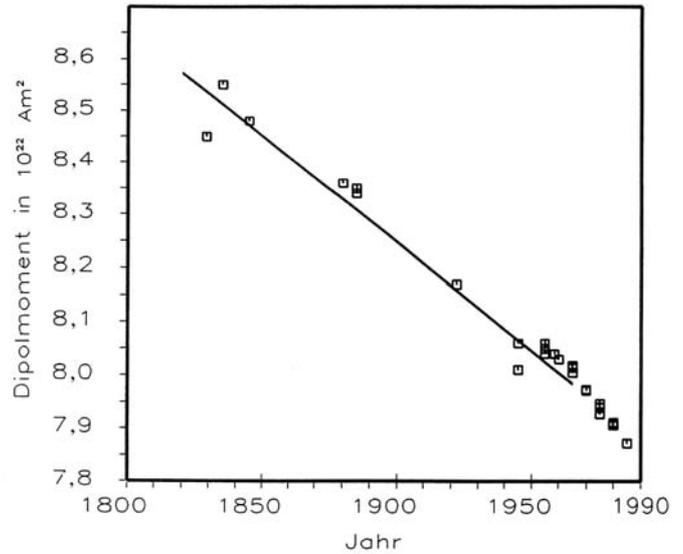


Abb. 10: Abnahme des Dipolmoments der Erde, beginnend mit den Gauß'schen Ergebnissen aus der ersten Hälfte des vorletzten Jahrhunderts. Die beschleunigte Abnahme in den letzten Jahrzehnten wird durch neuere Analysen bestätigt.

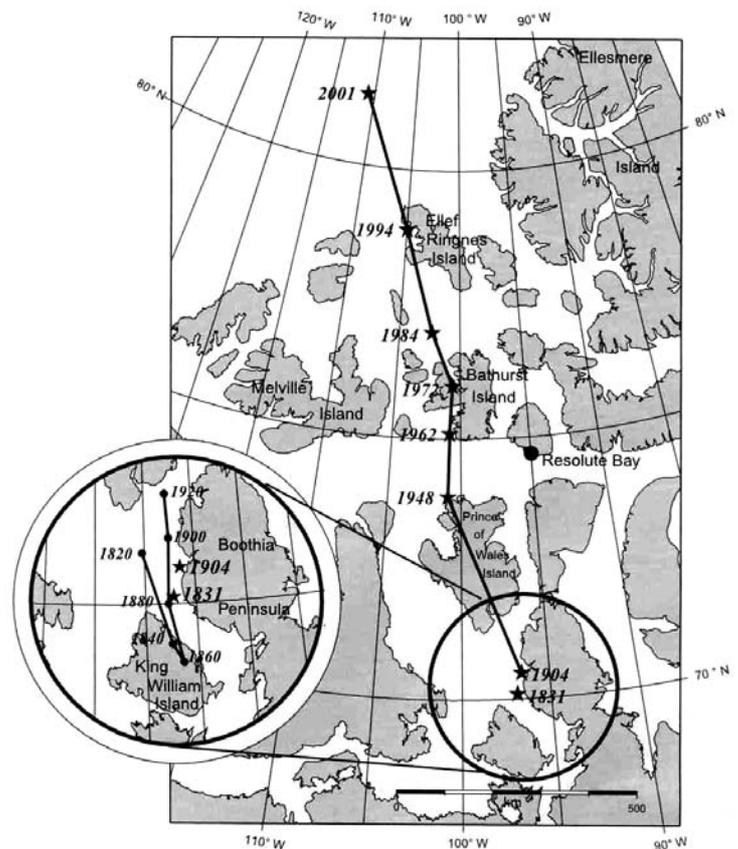


Abb. 11: Die Wanderung der Dip-Pole ist ein Phänomen der Säkularvariation. Hier die Darstellung des arktischen Magnetpols (aus MANDEA und DORMY 2003). Auffällig ist eine rezente Zunahme der Geschwindigkeit, die jedoch mit der beschleunigten Abnahme des Dipolmoments (Abb. 10) nichts zu tun hat (siehe Text). Zwischen 1831 und 1904 ist der Pfad unklar, da keine Messungen (Sterne) vorliegen. Das eingblendete Ergebnis nachträglicher Kugelfunktionsanalysen (Punkte) deutet auf eine Schleifenbewegung Richtung Süden hin.

dieser Expedition: Felix Booth. Er hatte zur Bedingung gemacht, dass der Ort der Entdeckung seinen Namen tragen mußte. Mit einem gemessenen Wert von  $89^{\circ} 59'$  kam Ross dem Dip-Pol sehr nahe.

Weitere Bestimmungen fanden nicht vor Beginn des vergangenen Jahrhunderts statt. Abb. 11 zeigt den Verlauf des arktischen Dip-Pols ab 1831 bis zu seinem aktuellen Ort, gemessen 2001 (NEWITT et al. 2002). Die Wanderungsgeschwindigkeit nach Norden nimmt danach deutlich zu. Bereits NEWITT und BARTON (1996) vermuteten einen Zusammenhang mit einer plötzlichen Änderung im Trend der Säkularvariation („jerk“), die 1969/1970 weltweit beobachtet wurde (nächster Abschnitt). Diese Annahme fanden NEWITT et al. (2002) bestätigt. Die aufkeimende Frage jedoch, ob das Phänomen der beschleunigten Polwanderung als Beleg für die dramatische Abnahme des Dipolmoments in den letzten Jahrzehnten zu werten ist, wird durch MANDEA und DORMY (2003) widerlegt. Sie zeigen, dass – im Gegensatz zum arktischen Dip-Pol – der antarktische recht stabil liegt. Das ist letztlich darauf zurückzuführen, dass dort der lokale Gradient der Horizontalintensität erheblich größer ist.

#### Säkularvariation und „jerks“

Nach Abschnitt 3 ist die Registrierung der Säkularvariation (SV) eine Domäne der Observatorien. Abb. 12 zeigt die Deklination und deren zeitliche Änderung in Form von überlappenden Jahresmitteln (Kreise) der Station Wingst an der Niederelbe (Abb. 5). Da die SV ein regionales Phänomen ist, ist die Darstellung repräsentativ für den gesamten norddeutschen Raum. Die Serie beginnt mit dem Zeitpunkt der Einrichtung des Observatoriums 1938. Seitdem wird in Wingst ohne Unterbrechung beobachtet.

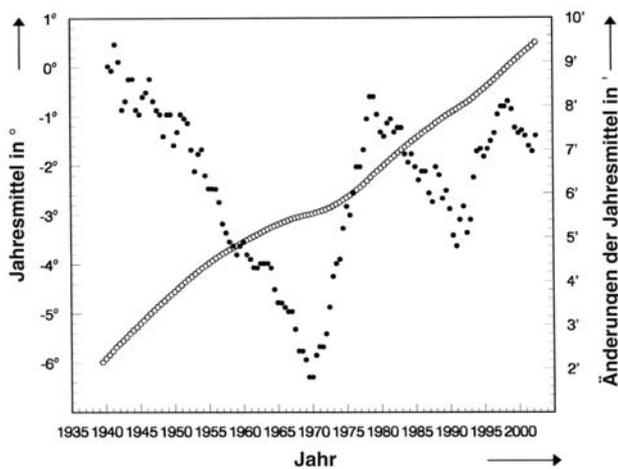


Abb. 12: Das Erdmagnetische Observatorium Wingst registriert seit 1938 unterbrechungsfrei die Deklination. Dargestellt sind Jahresmittel, ausgedrückt in Bogengrad, zentriert jeweils am Anfang und in der Mitte eines jeden Jahres (Bezugsordinate links), sowie deren Differenzen, ausgedrückt in Bogenminuten (Bezugsordinate rechts). Diese zeigen spontane, scharf ausgeprägte Richtungswechsel, sogenannte „jerks“, die weltweit beobachtet werden. Die Quellen dieser Ereignisse liegen wahrscheinlich im Erdinneren. Bemerkung am Rande: Für die Kompaß-Navigation ist die möglichst frühzeitige Erkennung der „jerks“ von wesentlicher Bedeutung, da davon die Güte der Vorhersage entscheidend abhängt.

Auf der linken Skala entnehmen wir, dass die Kompassrichtung in der Vergangenheit im Mittel alle 10 Jahre um ein Bogengrad zugenommen hat. 1998 wurde Wingst von der Agone, der Linie verschwindender Missweisung, von Osten her überquert. Zu erkennen ist eine Feinstruktur, die über die Differenzbildung (Punkte) der Epochenwerte deutlicher wird (rechte Skala, Bogenminuten). Die Struktur weist 1970 einen markanten Richtungswechsel auf, und danach noch drei weitere mit einem zeitlichen Abstand von etwa zehn Jahren: 1979, 1991 und 1999. Deren Bezeichnung „jerk“ ist dem Angelsächsischen entliehen und bedeutet hier eine Unstetigkeit in der zeitlichen Ableitung oder Sprung in der Beschleunigung der Deklination. Die „jerks“ werden weltweit beobachtet und finden – wie schon im letzten Abschnitt erwähnt – eine Entsprechung in der beschleunigten Bewegung des arktischen Dip-Pols. Weltweite Verteilungsmuster der Beträge der zweiten Ableitungen und der Zeitpunkte der Beobachtung an den Observatorien sind in wesentlichen Merkmalen ähnlich (De MICHELIS et al. 1998), deuten also auf einen einheitlichen allen „jerks“ zugrunde liegenden verursachenden Prozeß hin.

Liegen die Ursachen im Erdinneren oder außerhalb? Die Kontroverse darüber ist noch nicht endgültig abgeschlossen, allerdings überwiegen heute die Befürworter von Quellen im Bereich des Erdkerns und führen z. B. Ergebnisse der Potentialtrennung ins Feld (MALIN und HODDER 1982), bei denen die inneren Anteile deutlich vor möglichen äußeren dominieren. Ihre These setzt allerdings eine relativ geringe Leitfähigkeiten im Erdmantel voraus. Andernfalls könnten die „jerks“ wegen des Skineffekts nicht in der beobachteten Schärfe (Wechsel der Richtung während ein bis zwei Jahren) in Erscheinung treten. Gegner interner Quellen

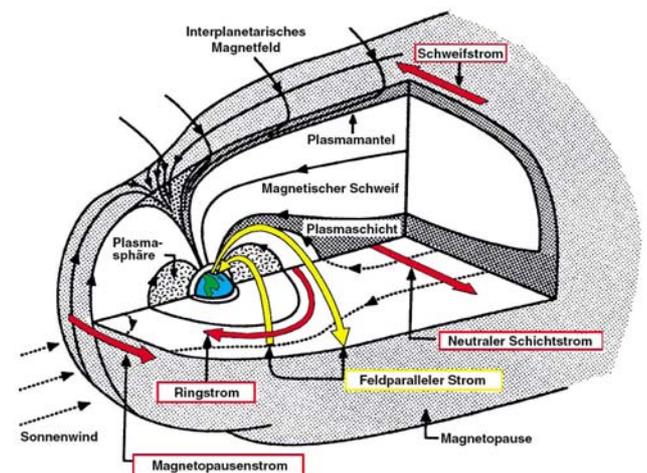


Abb. 13: Die Quellen aller externen Felder befinden sich im Bereich der Magnetosphäre und ihren Grenzschichten, der Ionosphäre und der Magnetopause. Diese Abbildung zeigt ein Modell der Magnetosphäre (aus MAUS et al. 2002). Magnetopausen- und Ringstrom schlagen sich deutlich in der Morphologie eines magnetischen Sturmes (Abb. 14) nieder: Der Magnetopausenstrom ist die Antwort auf einen plötzlichen Anstieg der Intensität des Sonnenwindes und hat in der Regel eine Zunahme der Horizontalintensität  $H$  zur Folge. Der Ringstrom (siehe Text) entwickelt sich erst Stunden später voll aus und fließt in die entgegengesetzte Richtung.

(z. B. ALLDREDGE 1984) propagieren und belegen Quellen in der Magnetosphäre (insbesondere Ringstromeffekte, Abschnitt 5).

### 5 Variationsfeld

Bisher wurden aus dem Spektrum der Variationen einige Beispiele herausgegriffen, die dem säkularen Anteil und damit im wesentlichen inneren Quellen zuzuschreiben sind. Kurzfristige Variationen von Perioden bis zu einem Jahr hingegen sind Stromsystemen in der höheren Atmosphäre, also äußeren Quellen, zuzuordnen. Dazwischen liegen Perioden bis in den Bereich des Sonnenflecken-Zyklus (elf Jahre), wo eine Trennung von den inneren Anteilen schwierig wird (siehe letzter Abschnitt). Eine Sonderstellung nimmt das induzierte Feld ein (siehe Abschnitt 2).

In einer Entfernung von mehreren Erdradien überwiegt der Dipolanteil des Erdmagnetfeldes bei weitem (Abb. 13, aus MAUS et al. 2002). Erst die Interaktion mit dem Sonnenwind (Elektronen, Protonen, Alpha-Teilchen) erzeugt die charakteristische Deformation zu einem Gebilde mit gestauchter Front an der der Sonne zugewandten Seite und einem weit über die Mondbahn hinausragenden Schweif. Das Innere, begrenzt durch die Magnetopause gegen den interplanetaren Raum und durch die Ionosphäre zur Erde hin, wird von der (elektrisch leitfähigen) **Magnetosphäre** ausgefüllt.

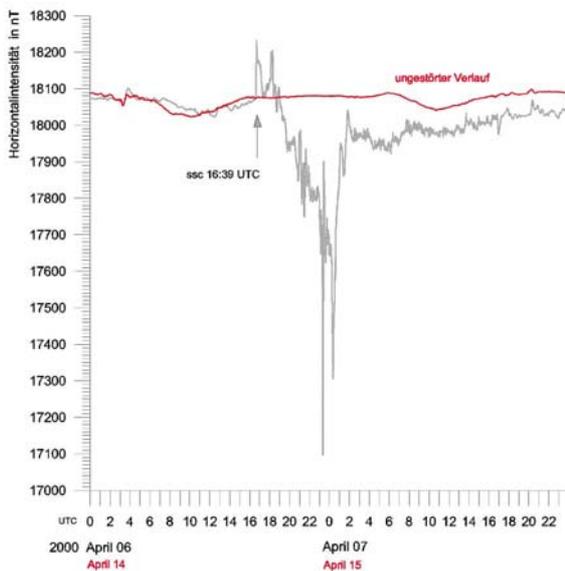


Abb. 14: Registrierbeispiel (Horizontalintensität H) am Observatorium Wingst. Gezeigt ist der magnetische Sturm von 6. auf den 7. April 2000. Nach dem ssc („sudden storm commencement“) folgen die Auswirkungen polarer Ionosphärenströme (Elektrojets), die den sonst nur vom täglichen Gang modulierten Verlauf (Registrierung vom 14. auf den 15. April, rot) erheblich stören können. Die starke Depression um die Mitternachtstunden ist dem Ringstrom zuzuschreiben – mit einer oft über mehrere Tage andauernden Nachlaufzeit.

Im Lee-Bereich der Magnetopause fließt ein Strom, dessen Stärke und Richtung (von West nach Ost) so dimensioniert ist, dass der planetarische Raum im Sonnenwind feldfrei bleibt. Je nach dem Grad der Sonnenaktivität verändert die Magnetosphäre ihre Form und ihr Volumen; im gleichen Rhythmus wird der Magnetopause-Strom moduliert. Der **Ringstrom** hingegen fließt von Ost nach West. Er wird gespeist von niederenergetische Elektronen und Protonen, die die Plasmasphäre bevölkern: Durch Oszillation entlang und Gyration quer zum Feldverlauf ergibt sich eine zonale Driftbewegung, eben der Ringstrom. Wichtig sind auch die elektrischen Ströme entlang des Feldverlaufs („field-aligned currents“). Sie werden in der Ionosphäre kurz geschlossen. Eine letzte Anmerkung zum Magnetosphärenmodell: Elektronen, die an den singulären Stellen der Magnetopause („cusps“) in hohen Breiten eindringen, werden im Schweif durch einen Energie gewinnenden Prozeß („magnetic reconnection“) beschleunigt und erzeugen bei Wiedereintritt durch Wechselwirkung mit den Molekülen in der Ionosphäre die Polarlichter.

Abb. 14 zeigt als Registrierbeispiel des Observatoriums Wingst den erdmagnetischen Sturm vom 6. auf den 7. April 2000, hinterlegt mit dem ungestörten Verlauf der Horizontalintensität eine Woche später (rot). Genau um 16:39 UTC am 6. April traf eine Partikelwolke mit mehrfacher Geschwindigkeit des Sonnenwindes ein und regte den Magnetopausestrom an – nach der Lenzschen Regel so, dass ein Zusatzfeld in Richtung des Erdmagnetfeldes die Horizontalintensität um etwa 100 nT anhub (ssc, „sudden storm commencement“). Nach der Anfangsphase folgt die Hauptphase mit „substorm“-Variationen, die von der Fortsetzung der feldparallelen Ströme in der Ionosphäre, den polaren Elektrojets, verursacht werden. Darauf folgt in den Nachtstunden ein beträchtlicher Einbruch um etwa 1000 nT, der dem Ringstrom zuzuschreiben ist. Da auch der ungestörte Verlauf zum Vergleich eingetragen ist, erkennt man gut, dass die Erholungsphase mehrere Tage (oder gar Wochen) anhalten und, wie wir wissen, bei Wiederholung durchaus externe Beiträge zur Säkularvariation liefern kann. Als „ungestört“ wird das Magnetfeld immer dann bezeichnet, wenn die beschriebenen Einflüsse der Partikelstrahlung der Sonne fehlen. Es verbleibt dann immer noch die Wirkung der Wärmestrahlung, die über die Ionisation der leitfähigen Ionosphäre flächenhafte Stromsysteme generiert. Deren täglicher Gang ist ein Abbild der modulierenden Gezeiten der höheren Atmosphäre mit einer Tagesperiode und höheren Harmonischen. Die Registrierungen des Observatoriums Wingst können in Echtzeit unter [http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/Other/BothObs\\_e.html](http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/Other/BothObs_e.html) abgerufen werden.

### 6 Paläomagnetismus und Plattentektonik

In Abschnitt 2 wurde das Anomalienfeld angesprochen, das seinen Ursprung in der oberen Erdkruste hat. Es handelt sich hier zum großen Teil um die remanente Magnetisierung von Gesteinskörpern. Z. B. richten sich bei der Abkühlung von vulkanischen Gesteinen Magnetit-Hämatit- oder Eisenkristalle beim Unterschreiten der Curietemperatur zwischen 500° C und 800° C nach der gerade am Ort herrschenden Magnetfeldrichtung aus und die Feldrichtung wird „eingefroren“ (vergleiche die Temperatur mit der Schmelztemperatur von 1000° C bis 1300° C bei silikatischen Gesteinen). Man spricht dann von **thermoremanenter Magnetisierung (TRM)**.

Bei marinen Sedimenten kann es ebenfalls zu einer Ausrichtung der eisenhaltigen Bestandteile während der Ablagerung kommen. Es handelt sich dann um „detrital remanent magnetization“ (DRM).

Die Entdeckung der Feldumpolungen an remanent magnetisierten Gesteinen zusammen mit ihrer zeitlichen Einordnung führte zur Akzeptanz der Plattentektonik in den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Alfred WEGENER formulierte 1912 das Konzept der Kontinentaldrift. Er scheiterte u. a. an der Frage nach den Antriebskräften für die Bewegung der Kontinentalplatten.

Vermessungen der weltweiten Topographie des Ozeanbodens in den vierziger bis sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts führte zur Entdeckung eines weltumspannenden unterseeischen Gebirgssystems, die unterseeischen Rücken. Es fiel schon früh eine Symmetrie der topographischen Formen zur Scheitellachse der Rücken auf. In den sechziger Jahren lagen magnetische Vermessungen über Teilabschnitte der Rücken vor. Als Beispiel wird hier die magnetische Vermessung des Reykjanes-Rückens südwestlich von Island gezeigt. Dabei ergab sich ein alternierendes Muster für die magnetische Induktion mit heutiger und inverser Richtung des Magnetfelds (Abb. 15). Zusammen mit der Topographie der Rücken wurden die Befunde wie folgt gedeutet. Konvektionen im Mantel fördern heißes Material an die Basis der Lithosphäre (ozeanische Kruste plus fester Teil des oberen Mantels). Die Lithosphäre reißt auf und Laven werden an die Oberfläche gefördert. Bei Unterschreiten der Curietemperatur wird die Richtung des Magnetfeldes eingefroren. Durch wiederholtes,

zeitlich unregelmäßiges Aufreißen und Erstarren während normaler und inverser Richtung des Magnetfeldes wird die Lithosphäre von der Rückenachse weg zu den Seiten geschoben und es bildet sich das achsensymmetrische unregelmäßige Streifenmuster aus. Dieser Prozess wird „seafloor spreading“ genannt und war entscheidend für die Anerkennung der Plattentektonik. Im Gegensatz zu Alfred Wegener spricht man heute von Lithosphärenplatten, die ozeanische und kontinentale Bereiche umfassen können und nicht mehr von der Verschiebung von kontinentalen Krustenblöcken. Das Streifenmuster erscheint übrigens in Abb. 4 (Abschnitt 3) nicht, da sie zu kleinräumig sind.

Die Erkenntnisse des „seefloor spreading“, kombiniert mit den Ergebnissen anderer Methoden, z. B. der Untersuchung von Sedimentkernen der Tiefsee (also abgelagert über DRM, siehe oben), haben zu einer magnetostratigraphischen Skala der Umpolungen geführt, die mittlerweile über 150 Millionen Jahre zurückweist. Abb. 16 zeigt einen Ausschnitt der vergangenen 3,5 Millionen Jahre (THOMPSON und OLDFIELD 1986). Die letzte Umpolung, der Übergang von der Matuyama- zur Brunhes-Epoche, die noch heute anhält und dadurch gekennzeichnet ist, dass Magnetkompasser nach Norden weisen, fand demnach vor 700.000 Jahren statt. Da man im Mittel mit einigen Umpolungen pro Jahrmillionen zu rechnen hat, ist die nächste Umpolung überfällig. Die Matuyama-Epoche folgt der Gauß-Epoche. Zwischenphasen, wie das Jaramillo-Ereignis, beziehen sich auf geologische Fundstätten, die erste Hinweise für die nur „kurz“ anhaltenden Episoden gegeben haben. So liegt Jaramillo z. B. in Patagonien.

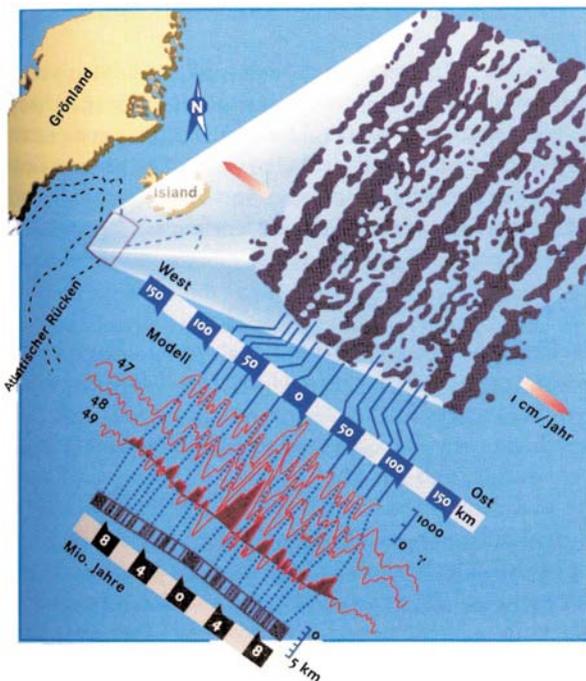


Abb. 15: Erdmagnetisches Streifenmuster über dem Reykjanes-Rücken südwestlich Islands, der ein Teil des Mittelatlantischen Rückens ist. Einige magnetische Profile (1  $\gamma$  entspricht 1 nT) und das Muster der Krustenmagnetisierung mit Zeitmaßstab sind eingezeichnet (von STROBACH, 1991, nach HEIRTZLER et al. 1966).

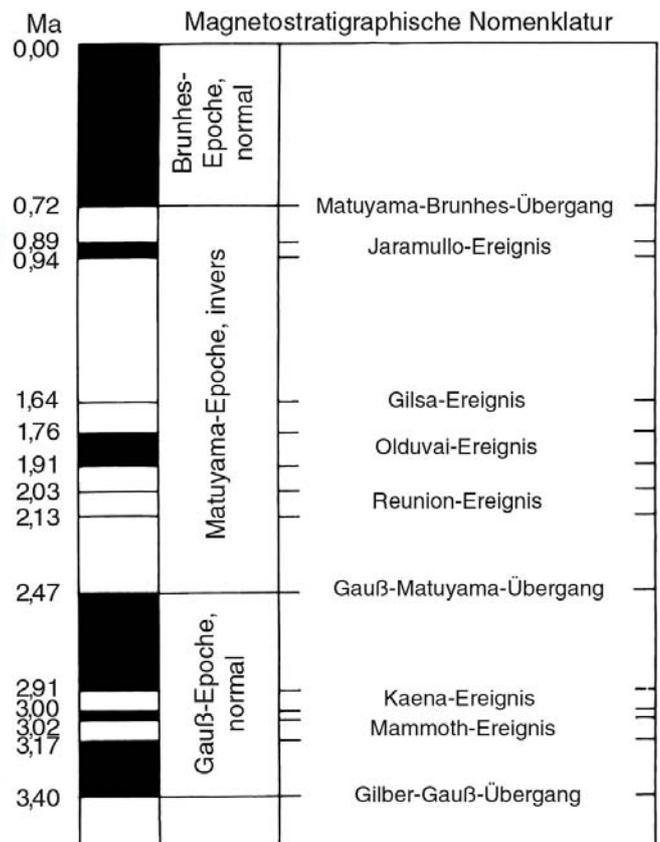


Abb. 16: Magnetostatigraphie für die letzten 3,5 Mio Jahre. Längere Epochen sind durch Zwischenereignisse unterbrochen. Deutlich wird, dass – statistisch gesehen – der nächste Wechsel schon lange überfällig ist.

## 7 Schlußbetrachtung

Neben dem hier diskutierten Magnetfeld der Erde gibt es ein weiteres wichtiges Potentialfeld: das der Schwere- oder Gravitation. Für das Magnetfeld hat der Mensch keine Wahrnehmung entwickelt. Gleichwohl gibt es Vorstellungen dieses Phänomens bei jedem, denn Magnet und Kompaß sind allen bekannt. Dagegen sind die Vorstellungen über das Schwerefeld sehr verschwommen, obwohl sie ja ständig als „Schwere“ des eigenen Körpers empfunden wird. Alle Phänomene jedoch, bei denen unsichtbare Kräfte wirksam sind – insbesondere der Astronomie – werden von Laien meistens magnetischen Wirkungen zugeschrieben. Das mag daran liegen, dass das Schwerefeld weniger spektakulär ist, obwohl es für die Welt um uns herum unentbehrlich ist. Das Schwerefeld ist im Vergleich zum Magnetfeld zu unseren Lebzeiten mehr oder weniger statisch, während die in diesem Artikel geschilderten Phänomene doch sehr dynamisch sind. Prosaisch könnte man sagen, das Magnetfeld ist „lebendig“ (wobei das hier nicht im Sinne einer lebendigen Erde gemeint ist, wie in der Science Fiction-Literatur und Esoterik spekuliert wird).

Diese „Lebendigkeit“ läßt sich auf einer größeren Zeitskala in der Paläomagnetik (Abschnitt 6) einige Milliarden Jahre weit zurückverfolgen. Beim Schwerefeld dagegen wissen wir nichts über das Paläofeld. Durch Massenverlagerungen an der Oberfläche und im Inneren der Erde hat es sicher Veränderungen des Schwerefeldes gegeben. Es ist aber kein Mechanismus für ein „Einfrieren“ des Paläoschwerefeldes wie beim Magnetismus bekannt. Das liegt letzten Endes daran, dass das (homogene) Magnetfeld auf Probekörper nur Drehmomente ausübt und keine anziehenden Kräfte, wie es das Wesen der Gravitation ist. Es gibt eben keine magnetischen Monopole!

Die Messungen der letzten hundert Jahre zeigen, dass das Magnetfeld dramatisch abnimmt (Abschnitt 4) und Paläodaten weisen sogar Umpolungen des Feldes nach. Hier gibt es Spekulationen und Befürchtungen, dass das Feld sehr schwach werden oder sogar völlig verschwinden und damit der Schutz durch die Magnetosphäre zusammenbrechen könnte (Abschnitt 5). Dann wäre das Leben dem Sonnenwind schutzlos ausgeliefert. Der damit verbundene ungehinderte Einfall energiereicher Teilchen würde das Leben stark gefährden. Aber keine Angst! Sowohl die Modellierungen als auch die Paläodaten zeigen, dass das Magnetfeld nicht völlig zusammenbricht. Bei der Schwächung des Dipols verstärken sich die Multipolkomponenten (Abschnitt 4). Die Magnetosphäre wird also nicht verschwinden. Sogar die Venus, die kein Magnetfeld besitzt, weist eine magnetosphärenartige Umgebung auf, die durch die Ionisation der hohen Atmosphäre durch den Sonnenwind erzeugt wird. Es sei hier noch einmal daran erinnert, dass die gegenwärtige Feldabnahme eher auf eine „Exkursion“ hinausläuft und sich somit wieder umkehrt, wie es in Abschnitt 4 beschrieben wurde (auf eine Umkehrung kommen zahlreiche Exkursionen).

Nach dem Gesagten könnte dieses eine Schädigung von Organismen bedeuten, andererseits aber auch einen Evolutionsschub wegen der höheren Mutationsrate. Zusammenfassend läßt sich sagen, dass das Magnetfeld das Leben schützt, seine großen Schwankungen aber auch die Evolution vorantreiben. Die letzten Bemerkungen zeigen, dass die Einbeziehung von Magnetfeldern eine Bedeutung für die Diskussion von Leben auf anderen Planeten hat.

## Literatur

- ALLDREDGE, L. R., 1984: A discussion of impulses and jerks in the geomagnetic field. *Journ. Geophys. Res.* **89**, 4403-4412.
- BALMER, H., 1956: Beiträge zur Geschichte der Erkenntnis der Erdmagnetismus. *Sauerländer*, Zürich.
- GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM [GFZ] (Hrsg.), 2002: Zweijahresbericht 2000/2001. GFZ Potsdam.
- GLATZMAIER, G. A., P. H. ROBERTS, 1995: A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.* **91**, 203-209.
- GLATZMAIER, G. A., P. H. ROBERTS, 1996: Rotation and magnetism of Earth's inner core. *Science* **274**, 1887-1891.
- HEIRTZLER, J. R., L. PICHON, J. C. BARTON, 1966: Magnetic anomalies over the Reykjanes Ridge. *Deep-Sea Res.* **13**, 427-443.
- JEANLOZ, R., 1983: Der Kern. Spektrum der Wissenschaft, 36-46, November.
- MALIN, S. R. C., B. M. HODDER, 1982: Was the 1970 geomagnetic jerk of internal or external origin? *Nature* **296**, 726-728.
- MANDEA, M., E. DORMY, 2003: Asymmetric behavior of magnetic dip poles. *Earth Planets Space* **55**, 153-157.
- MAUS, S., M. ROTHDER, H. LÜHR, V. HAAK, 2002: Kartierung des Magnetfeldes der Lithosphäre mit CHAMP. Zweijahresber. GFZ Potsdam 2000/2001, 15-24.
- MERRILL, R. T. M. W. MCELHINNY, P. I. MCFADDEN, 1996: The Magnetic Field of the Earth. *Academic Press*, San Diego, London.
- DE MICHELIS, P., L. CAFARELLA, A. MELONI, 1998: Worldwide character of the 1991 geomagnetic jerk. *Geophys. Res. Letter* **25**, No 3, 377-380.
- MICHLING, H., 1976: Carl Friedrich Gauß, aus dem Leben des Princeps Mathematicorum. Göttingen.
- NEWITT, L. R., C. E. BARTON, 1996: The position of the north magnetic dip pole in 1994. *J. Geomag. Geoelectr.* **48**, 221-232.
- NEWITT, L. R., M. MANDEA, L. A. MCKEE, J.-J. ORGEVAL, 2002: Recent acceleration of the North magnetic pole linked to magnetic jerks. *EOS Transactions* **83**, No 35.
- SONG, X., P. RICHARDS, 1996: Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core. *Nature* **382**, 221-224.
- STROBACH, K., 1991: Unser Planet Erde. *Bornträger-Verlag*, Berlin, Stuttgart.
- THOMPSON, R., F. OLDFIELD, 1986: Environmental Magnetism. *Allen a. Unwin*, London.

## Anschrift der Autoren:

Prof. Dr. Peter Janle  
 Institut für Geowissenschaften der Universität Kiel  
 Abteilung Geophysik  
 Otto-Hahn-Platz 1  
 24118 Kiel  
 pjanle@geophysik.uni-kiel.de

Dipl.-Geophysiker Günter Schulz  
 GeoForschungsZentrum Potsdam und  
 Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie  
 Erdmagnetisches Observatorium  
 Am Olymp 13  
 21789 Wingst  
 guenter.schulz@bsh.de

J. RAPP

# Das Satellitenbild des Monats Januar 2003 – Kondensstreifen von Handelsschiffen

## 1 Einführung

Solche Satellitenbilder, wie sie am 26. und 27. Januar 2003 von METEOSAT 7 und NOAA 16 aufgenommen wurden (Abb. 1), bekommen auch die Meteorologen nicht alle Tage zu sehen. Die ungewöhnlichen Wolkenstrukturen über der äußeren Biskaya, die sich als merkwürdige und sich kreuzende Linienformationen abbildeten, sind Kondensstreifen von Schiffen, also nichts weiter als niedrige und relativ flache Wolken. Auch wenn diese *ship tracks*, wie sie im englischen Sprachraum genannt werden, keine Bedeutung für die Analyse und Prognose des Wetters haben, veranschaulichen sie doch unmittelbar und eindrucksvoll einen Zustand der Atmosphäre, den man auf Satellitenfotos oft nicht so ohne weiteres wahrnehmen kann: das Phänomen einer großräumigen Absinkinversion.

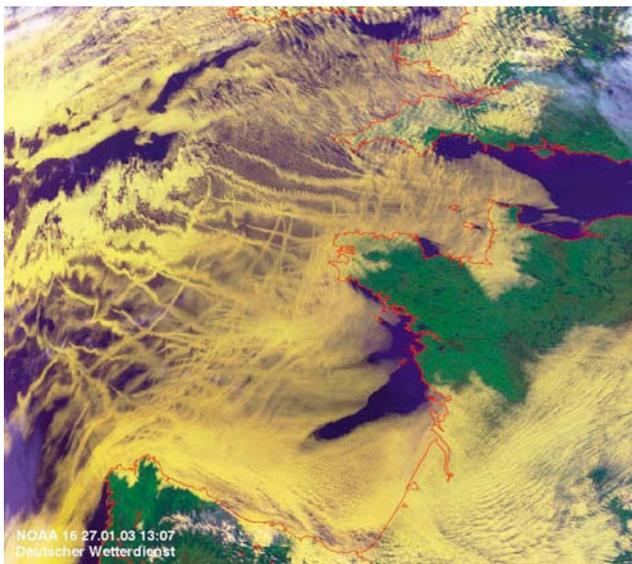


Abb. 1: Multi-Channel Farbkomposit Satellitenbild NOAA 16 vom 27.01.2003, 13.07 UTC.

## 2 Phänomen

Schon mit den frühen Wettersatelliten (TIROS-Serie) konnten schiffsinduzierte Wolken im visuellen Spektralbereich diagnostiziert werden (CONOVER 1966). Erste Berichte derartiger Wolkenstrukturen wurden allerdings schon gut 20 Jahre vorher, im Jahr 1944, publiziert (DURKEE et al. 2000a). In jüngerer Zeit hat DURKEE *ship tracks* definiert als „linienhafte, hellere Erscheinung im Infrarot-Satellitenbild, die mit der Abgasfahne eines Schiffes räumlich korreliert ist“. Dabei sind die Kondensstreifen von Schiffen ein Phänomen der maritimen Grenzschicht und durchschnittlich knapp

zehn Kilometer breit sowie einige hundert Kilometer lang. Ihr mittleres beobachtetes Alter liegt bei etwa sieben Stunden, sie können sich aber bei stabiler Atmosphärensichtung auch bis zu zwei Tagen halten. Sie erscheinen häufiger als Aufhellung einer bestehenden Wolkenschicht (Stratocumulus oder Stratus) denn als unabhängige, neue Wolken (PORCH und KAO 1990).

Als Ursachen der Bildung von *ship tracks* gelten die direkte Partikelemission der Schiffe, vorzugsweise der dieselbetriebenen Handelsschiffe auf den Hauptschifffahrtrouten. Daneben spielt der Transfer von Seesalzpartikeln in der unmittelbaren Nähe der Schiffe und die direkte Wärmeabfuhr eine Rolle. Als Folge nimmt die Aerosol- und Wolkentröpfchenkonzentration zu, während sich gleichzeitig die Tröpfchengröße verringert (DURKEE et al. 2000a).

## 3 Synoptisch-meteorologische Bedingungen

Voraussetzung für die Entwicklung der Kondensstreifen ist eine stabil geschichtete und feuchte untere Troposphäre mit sehr niedriger markanter Inversion. Häufig bildet sich an dieser Inversion flacher Stratocumulus (Passatbewölkung), der die maritime Grenzschicht nach oben begrenzt. Statistische Auswertungen (DURKEE et al. 2000b) zeigen, dass diese Schicht meist nur 400 bis 500 m dick ist. Die relative Feuchte der Luftmasse ist dabei hoch (mehr als 90 %, zum Teil auch Nebel), der Wind weht mäßig (durchschnittlich 8 m/s) und es herrscht eine geringe Differenz zwischen Luft- und Wassertemperatur.

Diese typischen synoptisch-meteorologischen Bedingungen sind häufig im Bereich der Subtropenhochs erfüllt, insbesondere über den Kaltwassergebieten des Ostpazifiks und des Nordatlantiks an der Ostflanke der Hochdruckzonen (PORCH und KAO 1990), wo sich unterhalb einer tief liegenden Absinkinversion tiefe Wolken bilden können (COAKLEY et al. 2000).

## 4 Ship Tracks vom 26./27. Januar 2003

Die synoptische Situation war Ende Januar 2003 über dem Nordostatlantik geradezu ideal für die Ausbildung von *ship tracks* (Abb. 2): Über dem Ozean befand sich ein kräftiges, nahezu stationäres Hochdruckgebiet mit einem Kerndruck von über 1040 hPa. Auf der Ostseite dieses Hochs herrschte bis in den Warmsektor der bei Island liegenden Sturmzyklone hinein großräumiges und starkes Absinken, das zu einer markanten Inversion führte, die sich in Bordeaux bei etwa 500 m ü. NN,

in Brest sogar nur bei 100 bis 200 m ü. NN befand (Abb. 3). Die Lufttemperatur lag oberhalb der Sperrschicht gut 5 K höher als darunter. Außerdem führte der Absinkprozess zu einer vertikal sehr ausgedehnten Austrocknung der Troposphäre. In der sehr flachen maritimen Grundschicht wiederum war die Sichtweite deutlich reduziert; meist betrug sie weniger als 2000 m, stellenweise sogar weniger als 1000 m (Nebel).

Über Land (Nordfrankreich) konnte die Inversion vom Boden her strahlungsbedingt aufgelöst werden, so dass bei nahezu wolkenlosem Wetter das trockenadiabatische Absinken zu einem deutlichen Temperaturanstieg auf rekordverdächtige 15 °C bis 18 °C führte, obwohl am Boden Nordwestwind wehte.

Auf dem Satellitenbild (Abb. 1) sind sowohl zonal orientierte Kondensstreifen, als auch *ship tracks* zu sehen, die stärker meridional verlaufen. Dabei nimmt ihre Breite mit zunehmender Entfernung vom Ausgangsort deutlich zu. Die meisten Quellen befinden sich im Bereich der Hauptschiffahrtstrassen (SMITH und SANDWELL 1996) westlich des Englischen Kanals.

Auf der Ostseite des nach Norden verschobenen Azorenhochs erkennt man auf dem Satellitenbild, wie die feuchte und mit den Kondensstreifen durchsetzte

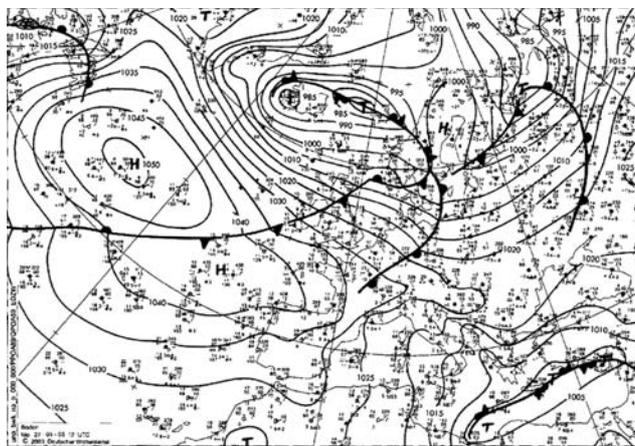


Abb. 2: Bodenanalyse des DWD vom 27.01.2003, 12 UTC.

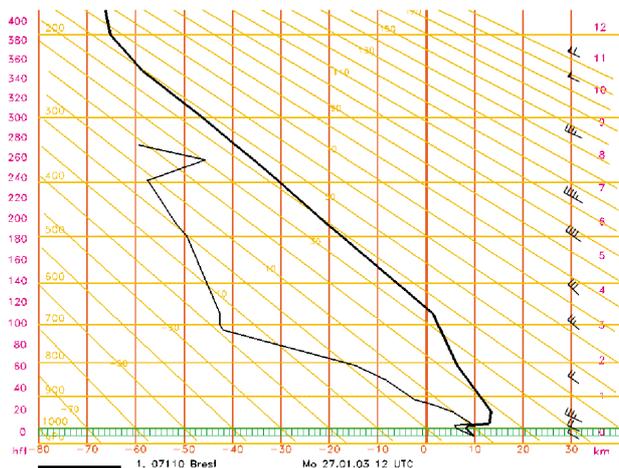


Abb. 3: Radiosondenaufstieg Brest vom 27.01.2003, 12 UTC.

flache Luftmasse an den Nordrand der Iberischen Halbinsel gedrückt wird, um anschließend, einem Wasserfall ähnlich, am Kap Finisterre Richtung Südwesten abzufließen. An dieser Stelle werden die Kondensstreifen gleichsam „gebündelt“. Ein anderer Teil dieser Luft strömt über das nordspanische Gebirge nach Süden und erzeugt über dem Binnenland zeitweise markante Leewellen, die im hier gezeigten Satellitenbild allerdings nicht zu erkennen sind.

Am linken Bildrand sind die Kondensstreifen wesentlich breiter, offenbar auch stärker verwirbelt und etwas gestaucht, was für ihr größeres Alter spricht (vermutlich älter als ein 1 Tag). In der äußeren nordwestlichen Bildecke schließlich erkennt man schon das Bewölkungsband der Kaltfront des Islandtiefs (Abb. 2), die im weiteren Verlauf südostwärts zog und bei gleichzeitigem Abbau des hohen Luftdrucks über der Biscaya die Kondensstreifen dort rasch auflöste.

Hinweis: Eine eindrucksvolle Satellitenbildanimation dieses seltenen Phänomens zeigt EUMETSAT auf seiner INTERNET-Homepage (EUMETSAT 2003).

**Literatur**

COAKLEY J. A., P. A. DURKEE, K. NIELSEN, J. P. TAYLOR, S. PLATNICK, B. A. ALBRECHT, D. BABB, F.-L. CHANG, W. R. TAHNK, C. S. BRETHERTON, P. V. HOBBS, 2000: The Appearance and Disappearance of Ship Tracks on Large Spatial Scale. *J. Atmos. Sci.* **57**, 2765-2778.

CONOVER J. H., 1966: Anomalous cloud lines. *J. Atmos. Sci.* **23**, 778-785.

DURKEE P. A., K. J. NOONE, R. T. BLUTH, 2000a: The Monterey Area Ship Track Experiment. *J. Atmos. Sci.* **57**, 2523-2541.

DURKEE P. A., R. E. CHARTIER, A. BROWN, E. J. TREHUBENKO, S. D. ROGERSON, C. SKUPNIEWICZ, K. E. NIELSEN, S. PLATNICK, M. D. KING, 2000b: Composite Ship Track Characteristics. *J. Atmos. Sci.* **57**, 2542-2553.

EUMETSAT, 2003: Ship trails in the region of the Bay of Biscaya. Internet: [http://www.eumetsat.de/en/area5/special/ship-trails\\_27012003.html](http://www.eumetsat.de/en/area5/special/ship-trails_27012003.html)

PORCH W. M., C.-Y. L. KAO, 1990: Ship trails and ship induced cloud dynamics. *Atmos. Env.* **24A**, 5, 1051-1059.

SMITH H. F., D. T. SANDWELL, 1996: Ship Tracks. Version 4.0. SIO.

**Anschrift des Autors:**

Dr. Jörg Rapp  
 Deutscher Wetterdienst – Zentrale Vorhersage  
 Postfach 10 04 65  
 63004 Offenbach/Main  
 E-Mail: Joerg.Rapp@dwd.de

P. LEMKE

# Einfache Energiebetrachtungen von realen und fiktiven Planeten

Einem außerirdischen Beobachter erscheint die Erde als blauweißer Planet: blau durch das in der Atmosphäre gestreute und am Ozean reflektierte Sonnenlicht; weiß durch die Reflexion an der Wolkenoberseite. Er erkennt eine Lufthülle um die Erde, die allerdings nur eine sehr dünne Schicht darstellt. Reduziert man die Erde auf normale Globusgröße (etwa 40 cm Durchmesser), dann beträgt die Dicke der Troposphäre (die unteren 12 km der Atmosphäre), in der das Wetter stattfindet, nur etwa 0,3 mm. In der Troposphäre befinden sich 80 % der gesamten Masse der Atmosphäre. Die Atmosphäre stellt also eine sehr dünne Schale dar, die den flüssigen und festen Teil der Erde umgibt. Diese dünne Schicht sorgt aber ganz entscheidend dafür, dass an der Erdoberfläche Bedingungen herrschen, die das Leben ermöglichen.

## 1 Energiebilanz von Venus, Erde und Mars

Das Strahlungsthermometer, das der außerirdische Beobachter auf die Erde richtet, zeigt einen Wert von  $-19^\circ\text{C}$  an. Dieser überraschend niedrige Wert lässt sich durch eine einfache Rechnung leicht verstehen. Die Erde empfängt am Oberrand der Atmosphäre eine mittlere Strahlungsleistung von  $S_e = 1368 \text{ Wm}^{-2}$  von der Sonne. Dieser Wert wird Solarkonstante genannt. Allerdings ist dies keine echte Konstante, denn die Strahlungsleistung pro Fläche (Bestrahlungsstärke) nimmt quadratisch mit dem Abstand von der Sonne ab. Für die Venus beträgt die „Solarkonstante“  $S_v = 2623 \text{ Wm}^{-2}$ , und für Mars nur  $S_m = 589 \text{ Wm}^{-2}$ .

Die von der Sonne auf einen Planeten treffende Strahlung wird von diesem teilweise reflektiert. Die Reflektivität (Albedo) eines Planeten hängt von seiner Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere aber von seiner Bewölkung ab. So ist die Albedo der vollständig bewölkten Venus  $\alpha_v = 0,77$ , die des wolkenfreien Mars  $\alpha_m = 0,24$  und die der teilweise bewölkten Erde  $\alpha_e = 0,31$ , d. h. 31 % der einkommenden solaren Strahlung werden von ihr wieder in den Weltraum zurück reflektiert.

Die von einem Planeten aufgenommene Energie wird im thermischen Gleichgewicht als Wärmestrahlung wieder in den Weltraum abgegeben. Das Gesetz der Wärmestrahlung besagt, dass die abgestrahlte Leistung pro Einheitsfläche proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur des strahlenden Körpers ist. Die Proportionalitätskonstante (die so genannte Stefan-Boltzmann-Konstante) beträgt  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ .

Berücksichtigt man, dass die gesamte von dem Planeten eingefangene (kurzwellige) Sonnenenergie in erster Näherung gegeben ist durch seine Querschnittsfläche multipliziert mit der entsprechenden Solarkonstanten abzüglich des reflektierten Anteils, und dass die gesamte abgegebene (langwellige) Wärmestrahlung berechnet wird durch seine Oberfläche multipliziert mit der Stefan-Boltzmann-Konstanten und der vierten Potenz der Temperatur, dann folgt für einen Planeten mit dem Radius  $r$

$$\pi r^2 (1 - \alpha) S = 4 \pi r^2 \sigma T^4 \quad (1)$$

Daraus folgt für die globale Strahlungstemperatur:

$$T = \sqrt[4]{S(1 - \alpha) / (4\sigma)} \quad (2)$$

Wie man sieht, ist die Lösung für die globale Strahlungstemperatur eines Planeten unabhängig von seiner Größe. Sie hängt nur von der Albedo  $\alpha$  und von der Solarkonstanten, d. h. dem Energieangebot der Sonne am Ort des Planeten ab.

Für die Erde folgt mit  $S_e = 1368 \text{ Wm}^{-2}$  und  $\alpha_e = 0,31$  eine Strahlungstemperatur von  $T_e = 254 \text{ K}$  ( $-19^\circ\text{C}$ ). Selbst wenn die Erde ein schwarzer Körper wäre und die gesamte solare Strahlung absorbieren würde, d. h.  $\alpha_{e,b} = 0$ , dann betrüge die Strahlungstemperatur nur  $T_{e,b} = 279 \text{ K}$  ( $6^\circ\text{C}$ ).

Für Venus und Mars folgen mit den oben genannten Werten:  $T_v = 227 \text{ K}$  ( $-46^\circ\text{C}$ ) bzw.  $T_m = 211 \text{ K}$  ( $-62^\circ\text{C}$ ). Obwohl die Venus viel dichter an der Sonne ist, liegt ihre Strahlungstemperatur deutlich unter der der Erde, da ihre Albedo wesentlich höher ist und sie deswegen weniger Sonnenenergie absorbiert.

## 2 Der Treibhauseffekt

Die niedrige Strahlungstemperatur von  $-19^\circ\text{C}$  herrscht zum Glück nicht an der Erdoberfläche, denn einige Gase in der Lufthülle der Erde (im Wesentlichen Wasserdampf und Kohlendioxid) sind strahlungsaktiv, d. h. sie sind gut durchlässig für die sichtbare Sonnenstrahlung, aber weniger gut durchlässig für die von der Erdoberfläche ausgesendete langwellige Wärmestrahlung. Dadurch werden die unteren Luftschichten erwärmt. In der Tat liegt die Lufttemperatur in Bodennähe (im globalen Mittel  $+14^\circ\text{C}$ ) deutlich über der oben genannten Strahlungstemperatur. Diese Tatsache wird zu einem beträchtlichen Teil durch die Absorptionseigenschaften der Atmosphäre, d. h. durch den natürlichen Treibhauseffekt<sup>1</sup> hervorgerufen. Die an der Wärmeabstrahlung der Erde beteiligten Bereiche sind im Wesentlichen die mittleren und hohen Schichten der Lufthülle und die Oberseiten der Wolken. Dadurch erscheint die Erde dem außerirdischen Beobachter als ein  $-19^\circ\text{C}$  kaltes Objekt.

Aus Strahlungstransportrechnungen folgt, dass die Oberflächentemperatur eines Planeten eine Funktion der optischen Dicke, d. h. der Absorptionseigenschaften seiner Atmosphäre ist. Je größer die Absorption (z. B. durch erhöhte Konzentration von Treibhausgasen) desto höher die Oberflächentemperatur. Die globale Strahlungstemperatur am Außenrand der Atmosphäre bleibt natürlich konstant solange die planetare Albedo konstant bleibt.

In erster Näherung lässt sich der globale Treibhauseffekt mathematisch folgendermaßen beschreiben: Wir betrachten die Atmosphäre als eine Schicht, die vollkommen durchlässig für die kurzwellige solare Einstrahlung ist, die aber einen Teil der terrestrischen Wärmestrahlung absorbiert. Unter der Voraussetzung, dass die Wärmeabstrahlung der Erde proportional zur Wärmeabstrahlung an der Erdoberfläche ist, folgt für die globale Energiebilanz

$$\pi r^2 (1 - \alpha) S = 4 \pi r^2 \beta \sigma T_0^4 \quad (3)$$

bzw.

$$T_0 = \sqrt[4]{S(1 - \alpha) / (4\beta\sigma)} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Obwohl der Vergleich der Atmosphäre mit einem „Treibhaus“ nicht ganz zutreffend ist, wollen wir den Ausdruck „Treibhauseffekt“ trotzdem verwenden, da er das Ergebnis sehr anschaulich beschreibt.

wobei  $T_0$  die Temperatur der Oberfläche und  $\beta$  eine Zahl zwischen 0 und 1 ist. Der Faktor  $\gamma = 1 - \beta$  charakterisiert die Strahlungseigenschaften der Atmosphäre, d. h. insbesondere den Treibhauseffekt. Setzt man die Oberflächentemperatur der Erde  $T_0 = 287 \text{ K}$  ( $+14 \text{ °C}$ ) ein, dann erhält man für den Treibhausfaktor  $\gamma = 0,39$  ( $\beta = 0,61$ ), d. h. die Wärmeabstrahlung der Erde am Außenrand der Atmosphäre beträgt nur 61 % der von der Erdoberfläche ausgesandten Wärmestrahlung. Setzt man für den Fall der Venus die gemessene Oberflächentemperatur ( $760 \text{ K}$ ) ein, dann ergibt sich ein Treibhausfaktor von  $\gamma = 0,992$ , bzw.  $\beta = 0,008$ . Die Venusatmosphäre besteht zu etwa 90 % aus  $\text{CO}_2$ .

Die Lufthülle schafft also durch ihre Strahlungseigenschaften optimale Lebensbedingungen auf der Erdoberfläche. Nur durch den natürlichen Treibhauseffekt ist Leben auf unserem Planeten möglich. Durch diese Strahlungseigenschaften bestimmt die Atmosphäre die Energiebilanz auf der Erde und spielt daher im Klimageschehen eine bedeutende Rolle.

### 3 Waterworld

Kevin Costner als Mariner im Film Waterworld hatte sicherlich andere Prioritäten als sich Gedanken über die Energiebilanz seines Planeten zu machen. Nehmen wir an, dass die Erde vollständig mit Wasser bedeckt, sie also ein einziger Ozean wäre, dann hätte ihre Albedo den Wert  $\alpha_w = 0,1$ . Nehmen wir weiter an, dass der Treibhausfaktor gleich dem der wirklichen Erde ist ( $\gamma = 0,39$ ), dann ergibt sich aus Gl. (4) eine Oberflächentemperatur von:

$$T_w = 307 \text{ K} (34 \text{ °C})$$

Waterworld ist also aufgrund der geringen Albedo um 20 K wärmer als die Erde.

### 4 Der Wüstenplanet

Frank Herberts wolkenloser Wüstenplanet Dune hat wohl eine mittlere Albedo von  $\alpha_d = 0,3$  (dies ist der Wert für eine Sandwüste). Unter der Annahme, dass die Solarkonstante gleich der der Erde ist und der Treibhausfaktor wegen des deutlich geringeren Wasserdampfgehaltes und der fehlenden Wolken in der Dune-Atmosphäre nur etwa ein Drittel des Erd-Treibhausfaktors, d. h.  $\gamma = 0,13$ , beträgt, ergibt sich eine Oberflächentemperatur von:

$$T_d = 264 \text{ K} (-9 \text{ °C})$$

Eine wüstenähnliche Erde wäre also deutlich kühler.

### 5 Der Eisplanet

Es wird spekuliert, dass die Erde in ihrer Entwicklung einmal vollständig von Eis bedeckt gewesen sein könnte. In diesem Falle hätte sie eine Albedo von etwa  $\alpha_{ep} = 0,8$  gehabt. Mit dem heutigen Treibhausfaktor ergibt sich dafür aus Gl. (4) eine mittlere Temperatur von

$$T_{ep} = 211 \text{ K} (-62 \text{ °C})$$

Hier wird deutlich, welcher starken Effekt die Albedo auf die globale Energiebilanz hat. Es wird spekuliert, dass verstärkter Vulkanismus den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre soweit erhöhte, dass der damit verbundene größere Treibhauseffekt die Erde schließlich wieder aus den Gefrierschrankverhältnissen befreit hätte. Benutzt man Gl. (4), dann ist ein Treibhausfaktor von  $\gamma = 0,785$  notwendig, um bei einer Albedo von  $\alpha_{ep} = 0,8$  eine positive globale Oberflächentemperatur zu

erhalten, das bedeutet mehr als eine Verdoppelung des Treibhausfaktors. Berücksichtigt man allerdings, dass Vulkanstaub Eis und Schnee verschmutzt und damit die Albedo herabsetzt (M. Claußen, pers. Mitteilung), dann reicht bei einer Albedo von  $\alpha_{ev} = 0,55$  für schmutziges Eis schon ein Treibhausfaktor von  $\gamma = 0,51$  aus, um Schmelzbedingungen an der Oberfläche zu erzeugen.

### 6 Wolken auf Waterworld und dem Eisplaneten

Wolken beeinflussen die planetare Albedo ganz entscheidend. Sie selbst haben eine Albedo von 0,5 und mehr. Nehmen wir nun an, dass Waterworld und der Eisplanet zur Hälfte mit Wolken bedeckt seien, und diese Wolken hätten eine Albedo von  $\alpha_c = 0,5$ . Dann folgt für die planetare (global gemittelte) Albedo  $\alpha_p$

$$\alpha_p = (1 - n)\alpha_0 + n\alpha_c \quad (5)$$

wobei  $n$  den Wolkenbedeckungsgrad,  $\alpha_0$  die Albedo der Oberfläche und  $\alpha_c$  die Albedo der Wolken darstellen. Für Waterworld ( $\alpha_0 = 0,1$ ) und den Eisplaneten ( $\alpha_0 = 0,8$ ) folgt dann  $\alpha_{w,p} = 0,3$  und  $\alpha_{ep,p} = 0,65$ , und damit

$$T_{w,c} = 288 \text{ K} (15 \text{ °C}) \text{ und } T_{ep,c} = 243 \text{ K} (-30 \text{ °C})$$

Durch den Einfluss der Albedo kühlen Wolken Waterworld und wärmen den Eisplaneten also recht deutlich. Nicht berücksichtigt ist hier der Einfluss von Wolken auf die Strahlung im Infrarotbereich.

### 7 Jupiter, die verhinderte Sonne

Die Solarkonstante für Jupiter beträgt  $S_j = 50,6 \text{ Wm}^{-2}$ . Mit seiner Albedo von  $\alpha_j = 0,73$  folgt aus Gl. (2) eine Strahlungstemperatur von

$$T_j = 88 \text{ K} (-185 \text{ °C})$$

Vor einigen Jahren hat die Raumsonde PIONEER die effektive Strahlungstemperatur von Jupiter bestimmt. Die Messungen ergaben einen Wert von  $T_{j,eff} = 125 \text{ K}$ , der also deutlich über der Strahlungstemperatur liegt. Die Lösung dieses Widerspruchs ergibt sich aus der Tatsache, dass Jupiter offensichtlich eine interne Energiequelle besitzt. Er ist vielleicht eine nicht richtig gezündete Sonne. Grund dafür wäre wohl seine etwas zu geringe Masse. Andererseits könnte er Energie aus einer gravitativen Schrumpfung gewinnen.

Die Größe dieser internen Energiequelle lässt sich folgendermaßen bestimmen. Die gesamte Energieabgabe von Jupiter durch Wärmeabstrahlung in den Weltraum ( $\sigma T_{j,eff}^4$ ) setzt sich zusammen aus der internen Energie  $F_i$  und der absorbierten Sonnenenergie,  $S_j(1 - \alpha_j)/4$ .

$$\sigma T_{j,eff}^4 = \sigma T_j^4 + F_i = \frac{S_j}{4}(1 - \alpha_j) + F_i \quad (6)$$

Daraus folgt

$$F_i = \sigma T_{j,eff}^4 - \frac{S_j}{4}(1 - \alpha_j) = 13,8 \text{ Wm}^{-2} - 3,4 \text{ Wm}^{-2} = 10,4 \text{ Wm}^{-2} \quad (7)$$

Die interne Energiequelle des Jupiters ist also dreimal so groß wie die von ihm absorbierte solare Strahlungsenergie.

### Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Peter Lemke  
 Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung  
 Postfach 12 01 61  
 27515 Bremerhaven  
 E-Mail: plemke@awi-bremerhaven.de

## Buchbesprechungen

LINDAU, R.: Climate Atlas of the Atlantic Ocean: derived from the Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set (COADS). Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001, 514 S. ISBN 3-540-66813-6, Preis: 209,- €

Im Klimasystem spielen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kompartimenten eine entscheidende Rolle. Sie bestimmen die langsamen Veränderungen in ihnen und zwischen ihnen. Der Ozean als größtes Reservoir von Wärme, Frischwasser und Energie bestimmt dabei eindeutige Raum- und Zeitskalen. Hier nun bekommen die Flüsse zwischen Atmosphäre und Ozean und ihre genaue Quantifizierung eine wichtige Aussagekraft. Um die Veränderungen im Klimasystem bestimmen zu können, bedarf es statistisch abgesicherter kohärenter und konsistenter Referenzdatensätze. Diese auch als Klimatologien bezeichneten Datensätze dienen als Beschreibung nicht nur des großräumigen Geschehens und seiner Veränderlichkeit über einen bestimmten Raum und eine bestimmte Periode, sondern dienen auch als Maßstab für die Beurteilung von aktuellen oder regionalen Daten.

Lindau setzt mit seinem Atlas die Arbeiten von Bunker, Isemer und Hasse fort und erweitert sie. Dabei kann er auf die inzwischen besser dokumentierten Schiffsbeobachtungen des COADS-Datensatzes zurückgreifen. Zu Hilfe kommen ihm dabei neue Methoden, Technologien und Medien. Damit öffnet er dem Leser oder Anwender einen individuellen Zugang und erweitert den Nutzerkreis beträchtlich. Sein Referenzdatensatz ist wegen seiner höheren Genauigkeit von beträchtlichem Wert und zeigt neue Zusammenhänge auf über die Verteilung und Variabilität atmosphärischer und ozeanischer Größen. Dies jedoch steht nicht in dem hier besprochenen Buch, sondern in seinen wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Dazu sagt das Literaturverzeichnis zu wenig.

Der Atlas besteht aus einem kurzen, viel zu kurzen Textteil, den zahlreichen graphischen Darstellungen und der CD-ROM. Die graphischen Darstellungen wiederum sind unterteilt in den Beobachtungsteil Part I und den der abgeleiteten Größen, „Air-Sea Interactions“, Part II. In diesen beiden Teilen wiederum folgen auf die zeit-breiten-abhängigen Darstellungen die des Jahresganges an ausgewählten Positionen und schließlich die Karten. Dies jeweils für die beobachteten Größen des Teils I und die der abgeleiteten Größen des Teils II. Hier bedeutet „air-sea temperature“, wie sich später auf der CD-ROM herausstellt, „Air/Sea Surface Temperature Differences“. So häufen sich Unstimmigkeiten.

Man muss also in diesem Atlas blättern oder suchen. Dort jedoch hilft das Inhaltsverzeichnis nicht weiter oder nur ungefähr, denn die Seitenzahlen stimmen nicht, laufen auseinander. Der entsprechende Beizettel ist also nur die erste Überraschung. Diese Erfahrung lenkt dann die Aufmerksamkeit auf Druckfehler und andere verpasste Gelegenheiten: man beginnt zu bedauern, dass Autoren heute mit der Schlussredaktion und der Satzherstellung alleine gelassen werden...

Die Vielzahl der aufschlussreichen, interessanten und notwendigen Abbildungen verleitet zum vergleichen, blättern. Dann möchte man gerne nachschauen, wie der „Ekman Volume Transport“ gerechnet ist, oder das „air-sea surface mixing ratio“ definiert oder die „stream function of Sverdrup transport“. Dort nun versagt der Text, es

gibt keine strukturierte Ableitung dessen, was im Abbildungsteil dargestellt wird. Auch nicht über die viele Arbeit, die in die Herstellung des Referenzdatensatzes gegangen ist. Nichts über die Art der Interpolation, deren Fehlerellipsen, der Unsicherheiten.

Diese Bemerkungen zur Qualität der herausgeberischen Sorgfalt setzen sich bruchlos fort für die CD-ROM: Im Buch gibt es keinen Hinweis auf Anwesenheit, Inhalt oder Struktur der CD-ROM. Also probieren. Dort nun findet man die Bilder des Atlas in Farbe wieder. Weder sind sie dem Format eines Bildschirms angepasst, also nicht vollständig lesbar, noch sind sie standfest. Beim Durchklicken wackelt das Bild. Und die nahe liegende Animation, also Zusammenfügung der vorhandenen Monatsdarstellungen zu einem Film des Jahresgangs gibt es nicht, schade. Gravierend ist jedoch, dass die digitalen Datensätze nicht vorhanden sind, also nur Bilder. Dabei ließen sich diese heute leicht zusätzlich auf diesem Speichermedium unterbringen. Und im Buch wiederum fehlt der Hinweis auf eine ftp-Adresse, wo die Datenfelder erreichbar sind. Also leider doch kein direkter quantitativer Vergleich etwa mit neuen oder anderen Datensätzen.

Kurzum, verlockend für den Einsteiger, der über den Atlantik etwas wissen will. Ermutigend für den Neugierigen, aber unbefriedigend für den Kollegen. Dieser wollte eigentlich alles über die Meteorologie und die Ozeanographie an der Grenzfläche des Atlantischen Ozeans zwischen zwei Buchdeckeln haben. Also, doch eine verpasste Gelegenheit?

K. P. Koltermann, Hamburg

KRAUS, H; EBEL, U.: Risiko Wetter. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003, 253 S. ISBN 3-540-00184-0, Preis: 24,95 €

„Lothar“ und „Anna“, Oderhochwasser, Elbehochwasser, Gewitterstürme, Hagelschlag: die Schlagzeilen der letzten Jahre erinnern daran, dass auch in Mitteleuropa durchaus ernstzunehmende Wettergefahren drohen. Internet, Fernsehen, Rundfunk und Zeitungen sorgen dafür, dass diese Informationen jeden in Deutschland erreichen. Angesichts eher geringer Kenntnisse für meteorologische Zusammenhänge in der Bevölkerung haben sich die beiden Autoren – Hochschulprofessor der eine (H. Kraus), Versicherungsmeteorologe der andere (U. Ebel) – das ehrgeizige Ziel gesetzt, die komplexen Vorgänge unterschiedlichster Wettergefahren einem breiten Leserkreis verständlich zu machen. Zusätzlich soll das Risiko gefährlicher Wettererscheinungen abgeschätzt werden. Die Zielgruppe umfasst Wissenschaftler, Meteorologen und Studierende sowie Versicherer, Rettungsdienste und Laien – kurzum: beinahe alle Wetterinteressierten.

Das Buch zeichnet sich durch einen klaren Aufbau aus. Die ersten 3 Abschnitte enthalten eine Einführung in die Meteorologie. Danach kommen die Autoren zur Sache: Abschnitt 4 widmet sich ausführlich dem Phänomen „Gewitter“ mit seinen Begleiterscheinungen. Abschnitt 5 den tropischen Wirbelstürmen. Der Abschnitt 6 befasst sich mit den Polarfrontzyklonen der gemäßigten

Breiten (von den Autoren etwas ungewöhnlich als „Mittelbreitenzyklonen“ bezeichnet). Schließlich werden auch die Risiken bei weniger dramatischen Wetterereignissen diskutiert, etwas euphemistisch mit „Risiken bei „friedlichem Wetter“ überschrieben. Das Buch schließt mit einem Anhang über atmosphärische Energien und ihre Berechnungen sowie mit tabellarischen Zusammenstellungen von Hochwasserschäden, einer graphischen Darstellung von Windgeschwindigkeit und Böen sowie einer kleinen Einführung in den Themenkreis „Wetterversicherungen“.

Mit viel Kenntnis und persönlichem Engagement sind die beiden Kapitel über konvektive Systeme und Hurrikans geschrieben. Sie bieten einen guten Überblick über die grundsätzlichen Mechanismen. Das gilt auch für die Darstellung außertropischer Zyklonen. Allerdings hätte dieses Kapitel in den Abschnitt über die allgemeine atmosphärische Zirkulation gehört, da die Zyklonen – wie auch von den Autoren konstatiert – einen unverzichtbaren und integralen Bestandteil der Zirkulation der gemäßigten Breiten darstellen und nur bei sehr speziellen Umfeldbedingungen unwetterträchtig sind.

Trotz kleinerer graphischer Flüchtigkeiten sind die Prozesse verständlich beschrieben. Man wünschte sich allerdings nicht nur Wirkungsdarstellungen, Zugbahnen von Hagelschlag oder Querschnitte von Windprofilen bei Downbursts. Solche Wetterereignisse haben eine meteorologische Vorgeschichte und eine jeweils „synoptische“ Gegenwart, aus der sich das Ereignis eben individuell nachvollziehen lässt. Das gilt auch für die Wetterlagen mit extremen Niederschlägen und Hochwasser sowie für die Orkantiefs. Es wird überwiegend wirkungs-, nicht aber entwicklungsorientiert dargestellt und damit das meteorologische Risiko auf eine klimatologisch-statistische Ebene projiziert. Der Verzicht auf synoptische Entwicklungsstrukturen begrenzt leider die Nutzung und Anwendung des Buches.

Interessant sind die an verschiedenen Stellen diskutierten Statistiken über Hurrikan- und Sturmhäufigkeiten sowie die Reflexion über Aussagekraft solcher vieljährigen Reihen auf mögliche klimatische Trends. Die Autoren beziehen sich frühzeitig auf das IPCC und warnen vor einer vorzeitigen dramatischen Interpretation auf der Grundlage nicht ausreichend langer Reihen. Sie beschreiben die deutlich angestiegenen Versicherungsschäden als Folge mehrerer Faktoren, wobei witterungsunabhängige Parameter wie Standortwahl, höhere Sachwerte, Zunahme des Wohlstands oder Lebensstandards dominieren.

Das Buch bietet einen informativen Querschnitt über die klassische Meteorologie der Zirkulationssysteme. Es zeigt interessante Aspekte zwischen Wetter, Risiko und Versicherungswirtschaft. Um einem breiten Leserkreis zugänglich zu werden, verzichtet es allerdings auf vertiefende Einblicke und beschränkt damit bedauerlicherweise seine Verständlichkeit und Anwendungsmöglichkeiten. Die Zeichnungen sind zwar weitgehend eine gute Ergänzung zum Text; der Einsatz moderner Grafikverfahren hätte jedoch dem Anliegen des Werkes (verständliche und anschauliche Darstellung für den Laien) gerade bei der Darstellung komplexer dreidimensionaler Vorgänge sehr genützt.

F.-U. Dentler, W. Seifert, Hamburg

# Habilitationen, Promotionen und Diplom-Hauptprüfungen im Jahr 2002

## Universität Bayreuth

### Diplom-Hauptprüfungen

- FRANKENBERG, Christian: Evaluating Stationarity and Related Phenomena in Ecological time Series.
- GRIESBAUM, Frank: Chemistry of Cloud Interstitial Particles: Sample Collection for Ion chromatography (IC), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Carbon (TC, EC, BC and OC) analysis.
- KLÖR, Cornelia: Spektral- und Filtrerradiometrie zur Analyse von Photolysefrequenzen atmosphärischer Spurengase am Standort ‚Waldstein‘ im Fichtelgebirge.
- MAUDER, Matthias: Auswertung von Turbulenzmessgerätevergleichen unter besonderer Berücksichtigung von EBEX-2000.
- RUPPERT, Johannes: Eddy sampling methods for the measurement of trace gas fluxes.
- SCHEER, Clemens: Evaluierung eines Modells zur Nebeldeposition in Mittelgebirgen.
- SODEMANN, Harald: Evaluation of the parameterisation for turbulent fluxes of momentum and heat in stable stratified surface layers.

## Freie Universität Berlin

### Habilitationen

- CHMIELEWSKI, Frank-Michael: Sensitivität von Pflanzen gegenüber klimatischen Veränderungen – dargestellt an Ergebnissen des agrarmeteorologischen Ertragsfeldes in Berlin-Dahlem und an Daten der Internationalen Phänologischen Gärten Europas.
- LANGEMATZ, Ulrike: Modellstudien zum klimatologischen Einfluss stratosphärischer Ozonänderungen.

### Promotionen

- HEISE, Stefan: Rekonstruktion dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen basierend auf CHAMP-GPS-Messungen.
- KRÜGER, Kirstin Daniela: Untersuchung von Transportprozessen: Simulation mit einem globalen Zirkulationsmodell.
- NEUSCHULZ, Hannelore: Thermophysiological Beanspruchung des menschlichen Organismus durch anisotrope Infrarotstrahlung.
- SCHÖLLHAMMER, Kathrin: Klimatologie der Schwerwellenaktivität in den mittleren Breiten.

### Diplom-Hauptprüfungen

- BÖSCHE, Eyk: Aufbau und Beschreibung eines Polarisations-Spektrometers für die Fernerkundung der Atmosphäre.
- FAST, Irina: Modelltheoretische Analyse der Wechselwirkungsprozesse im Klimasystem des Holozäns.
- GATZEN, Christoph: Untersuchungen zur Wirkung der inkrementellen digitalen Filterinitialisierung (IDFI) auf das Analysefeld des GME des Deutschen Wetterdienstes.
- HOFFMANN, Jan: Die allgemeine Zirkulation in der Stratosphäre: Eine EOF-Analyse der Berliner Daten.
- HÜNERBEIN, Anja: Vulkanismus – ein externer Klimafaktor. Modellstudie zum Einfluss des Vulkanismus auf das Klima der letzten tausend Jahre.
- WAGNER, Jochen: Langzeitvergleich von gemessener und modellierter UV-Strahlung im alpinen Gelände.
- WIECZORREK, Martin: Untersuchung zur Herkunft erhöhter Ozonbelastung auf Helgoland und Sylt.
- ZELLER, Olof: Niederschlagsschwankungen in der Sahelzone im 20. Jahrhundert: eine Literaturübersicht.
- ZOELLER, Matthias A.: Zur Klimatologie und Extremwertstatistik von Temperatur und Niederschlag im Mittelmeerraum und Maghreb.

## Universität Bonn

### Promotionen

- DENEKE, Hartwig Manfred: Influence of clouds on the solar radiation budget.
- GASSMANN, Almut: Numerische Verfahren in der nichthydrostatischen Modellierung und ihr Einfluss auf die Güte der Niederschlagsvorhersage.
- HAASE, Günther: A physical initialization algorithm for non-hydrostatic weather prediction models using radar derived rain rates.
- KELLER, Tilo: Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf das regionale Klima in Nordrhein-Westfalen.
- LÖHNERT, Ulrich: Derivation of cloud liquid water from ground-based active and passive microwave remote sensors.

### Diplom-Hauptprüfungen

- BACHNER, Susanne: Analysis of African Easterly Waves and associated convection using a non-hydrostatic limited-area model.
- GOSS, Stuart: On the relevance of low stratiform clouds for the global climate.

- KLINK, Stefan: Statistische Interpolation der COADS-Meeresoberflächentemperaturen unter Einbindung eines linearen Advektions-Diffusionsmodells.
- KREBSBACH, Marc: Untersuchungen von Turbulenzstrukturen in der stabilen Grenzschicht mit dem Lokal-Modell.
- PESCH, Lars: A finite-volume discretization of the shallow-water equations in spherical geometry.
- RAUTHE, Monika: Die außertropische atmosphärische Zirkulation: ihre Analyse, Sensitivität und Auswirkungen auf das regionale Klima – ein Superensemble-Ansatz.
- SCHLÜTER, Ingo: Einfluss der horizontalen Auflösung auf die Wolkensimulation des Lokal-Modells.
- TOST, Holger: Numerische Untersuchungen zur Aerosolchemie in der atmosphärischen Grenzschicht.
- WEBER, Steffen: Erweiterung eines AVN/MOS-Systems.

## Universität Cottbus

### Promotion

- SPRUNG, Detlev: Aufbau und Anwendung eines mittels chemischer Ionisation unter Atmosphärendruck arbeitenden Quadrupol-Massenspektrometers (AP-CIMS) für schnelle Spurengasmessungen.

## Universität Dresden

### Diplom-Hauptprüfungen

- HUHLE, Corinna: Verdunstungsbeiwerte auf Basis der Gras-Referenzverdunstung und globaler Datensätze der aktuellen Verdunstung für unterschiedliche Landnutzungen und Klimate.
- KETZER, Bettina: Vergleich von Landoberflächeneigenschaften abgeleitet aus NOAA-14 AVHRR und ERS-2 ATSR Satellitendaten.
- TITTEBRANDT, Antje: Ermittlung der langwelligen Ausstrahlung am Erdboden aus ERS 1/2-ATSR – und NOAA-AVHRR - Satellitendaten.

## Universität Frankfurt am Main

### Promotionen

- BUNDKE, Ulrich: Über die Variabilität der physikalischen Eigenschaften atmosphärischer Aerosolpartikel.

MÜLLER, Melanie: Untersuchungen stratosphärischer Transportprozesse mittels der Verteilung langlebiger Spurengase.

#### *Diplom-Hauptprüfung*

FUNDEL, Felix: Spektrale Varianzanalyse europäischer Klimazeitreihen.

---

### **Universität Freiburg**

---

#### *Promotion*

HABERER, Kristine: Auswirkungen von apoplastischem Ascorbat sowie weiteren physiologischen und meteorologischen Parametern auf den NO<sub>2</sub>-Gaswechsel von Pflanzen.

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

ANDREA, Savvas: Human-biometeorologische Bewertung des Klimas von Zypern.

BRUGGER, Ute: Langzeitliche Entwicklung von Lufttemperatur und Niederschlag als Forstmeteorologische Kenngrößen in Baden-Württemberg.

---

### **Universität Hamburg**

---

#### *Promotionen*

DIERER, Silke: Untersuchung von groß- und mesoskaligen Einflüssen auf die Entwicklung polarer Mesozyklonen mit Hilfe des Modells METRAS.

LEHMANN, Stefan: Ein Heterodyn-DIAL System für die simultane Messung von Wasserdampf und Vertikalwind: Aufbau und Erprobung.

LIESS, Stefan: Model studies of the tropical 30 to 60 day oscillation.

SCHÖTTLE, Sigrid: The impact of sea surface height data assimilation on El Niño analyses and forecasts (Auswirkungen der Assimilation von Meereshöhen-Daten auf Analysen und Vorhersagen von El Niño).

SEMMLER, Tido: Der Wasser- und Energiehaushalt der arktischen Atmosphäre.

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

BÖKEL, Frank: Turbulenzmessungen mit Ultraschall-Anemometer-Thermometern in 50 und 250 m Höhe am NDR-Sendemast in Hamburg-Billwerder: Erste statistische Auswertungen.

BUNGERT, Ursula: Bedeutung von Neueisbildung für die Entwicklung eines zyklonalen Wirbels an einer Polynja.

HOBE, Hendrik: Änderung der lokalen planetaren Albedo wolkenfreier Gebiete Mitteleuropas seit 1985.

KERBER, Agathe: Turbulente Bodenflüsse über Wasser und Meereis: Flugzeugmessungen und Modell-Parameterisierungen.

KLOSTER, Silvia: Untersuchung des Einflusses von Oberflächenfilmen auf die von der Meeresoberfläche emittierte und reflektierte thermische Strahlung.

MARMER, Elina: Modellierung von „Arctic Haze“ mit dem Chemie-Transport-Modell HIRHAM-CTM.

RAMM, Christina: Untersuchungen zum Zeitverhalten turbulenter Schadstoffausbreitungsvorgänge in den bodennahen Luftschichten der Atmosphäre.

SCHMITZ, Kerstin: Einfluss verschiedener Großwetterlagen auf die Albedo von Wolken.

WINGER, Katja: Compilation and evaluation of Krypton-85 emission inventories from 1945 until 2000.

---

### **Universität Hannover**

---

#### *Promotionen*

KÜHN, Gerald: Experimentelle Untersuchungen zur Entstehung und Ausbreitung von Staubfahnen hinter Kraftfahrzeugen.

SCHRÖTER, Michael: Untersuchung der Evolution von Konvektionsstrukturen bei Kaltluftausbrüchen mit Hilfe eines parallelisierten Grobstrukturmodells.

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

HEROLD, Marcus: Einfluss von zweidimensionalen Oberflächeninhomogenitäten auf die Struktur und Entwicklung der atmosphärischen Grenzschicht – Untersuchungen mit dem LES-Modell PALM.

KREYER, Oliver: Erste Untersuchungen zu dem SAFIR-Blitzmessnetz in Norddeutschland.

SPIESS, Thomas: Untersuchung zur Trägheit der Temperatur- und Feuchte-sensoren an Bord der Meßsysteme Helipod und Do-128.

WALTER, Torsten: Numerische Simulationen zur Ausbreitung von Schadstoffen und Bioaerosolen unter Berücksichtigung variierender meteorologischer Bedingungen.

---

### **Universität (TH) Karlsruhe**

---

#### *Promotionen*

RIEMER, Nicole: Numerische Simulationen zur Wirkung des Aerosols auf die troposphärische Chemie und die Sichtweite.

STOWASSER, Markus: Prozessstudien zur Ozonchemie in mittleren und hohen Breiten anhand von MIPAS B Daten.

BRAUN, Frank J.: Mesoskalige Modellierung der Bodenhydrologie.

SEIFERT, Axel: Parameterisierung wolkenmikrophysikalischer Prozesse und Simulation konvektiver Mischwolken.

MILZ, Mathias: Untersuchungen zur Messung von Wasserdampf in der tropischen Tropopausenregion mit MIPAS/Envisat.

KUNZ, Michael: Simulation von Starkniederschlägen mit langer Andauer über Mittelgebirgen.

KEIM, Corneli: Entwicklung und Verifikation der Sichtlinienstabilisierung für MIPAS auf dem hochfliegenden Forschungsflugzeug M55 Geophysica.

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

HASEL, Markus: Konvektive Vertikaltransporte über den französischen Seealpen (ESCOMPTE-Experiment).

KONANTZ, Bernd: Analyse der Zugbahnen sommerlicher konvektiver Zellen im Oberrheingebiet mit dem Zellverfolgungsalgorithmus TRACE3D.

STANZEL, Christina: Vertikale Windscherung in der atmosphärischen Grenzschicht.

STRAUB, Winfried: Verfahren zur Korrektur vertikaler Variationen der Reflektivität bei Niederschlagsmessungen mit einem C-Band Radar.

THÜRAUF, Jutta: Windsysteme und Spurenstoffausbreitung während ESCOMPTE.

WIEGELE, Andreas: Partitionierung und Massenbilanz von Chlorverbindungen im arktischen Polarwirbel und in mittleren Breiten aus MIPAS-B2-Messungen.

---

### **Universität Kiel**

---

#### *Promotion*

CLEMENS, Marco: Machbarkeitsstudie zur räumlichen Niederschlagsanalyse aus Schiffsmessungen über der Ostsee.

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

KAHL, Torben: Wasserdampfhaushalt über dem BALTEX-Gebiet.

KLEPPEK, Sabine: Einfluß der NAO auf das Klima Europas anhand von Verteilungsfunktionen atmosphärischer Parameter.

MEYER, Elke: Einfluß der windinduzierten Rauigkeit an der Ozeanoberfläche auf die Fernerkundung des Chlorophyllgehaltes.

OMRANI, Nour-Eddine: Validierung des regionalen Modells REMO im Klimamode.

SCHLIMME, Ingo: Der Einfluß von Kristallform und Größenverteilungen auf die solare Strahlungsbilanz von Cirruswolken.

---

### **Universität Köln**

---

#### *Diplom-Hauptprüfung*

BEYER, Björn: Zur Parameterisierung turbulenter Austauschprozesse in der Prandtlschicht.

BRÜCHER, Tim: Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Niederschlagscharakteristik im Bereich NRW.

HENNIG, Axel: Sensitivitätsstudien zur Erstellung von Schadstoffklimatologien.

- KRÜGER, Andreas: Statistische Regionalisierung des Niederschlags für Nordrhein-Westfalen auf Grundlage von Beobachtungsdaten und Klimaszenarien.
- PINTO, Joaquim José Ginete: Influence of Large-Scale Atmospheric Circulation and Baroclinic Waves on the Variability of Mediterranean Rainfall.
- RADDATZ, Thomas: Hoch- und ultrahochfrequente Variabilität im nordhemisphärischen Winter.

---

### Universität Leipzig

---

#### *Habilitation*

- HARLANDER, Uwe: On Rossby wave propagation in atmosphere and ocean.

#### *Promotionen*

- MASSLING, Andreas: Hygroscopic Properties of Atmospheric Particles over the Atlantic and Indian Oceans.
- MATTIS, Ina: Aufbau eines Feuchte-Temperatur-Aerosol-Ramanlidars und Methodenentwicklung zur kombinierten Analyse von Trajektorien und Aerosolprofilen.
- SIEBERT, Holger: Tethered-Balloon Borne Turbulence Measurements in the Cloudy Boundary Layer.
- SIMMEL, Martin: Ein Modul zur spektralen Beschreibung von Wolken und Niederschlag in einem Mesoskalenmodell zur Verwendung auf Parallelrechnern.
- WEX, Heike: Closure and Sensitivity Studies on Physical Parameters of Rural Continental Aerosols.

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

- BARTH, Manuela: Sensitivitätsstudien zur Auflösung turbulenter Strukturen im Bereich der atmosphärischen Grenzschicht mit einem Verfahren der akustischen Laufzeittomographie.
- ESFELD, Kathleen: Ballongestützte Messungen von Partikelkonzentrationen in der Marinen Grenzschicht.
- FISCHER, Corinne: Luftmassencharakterisierende Partikelgrößenverteilung des atmosphärischen Aerosol im Sommer über dem arktischen Ozean (AOE 2001).
- PHILIPPS, Sabine. Rekonstruktion von vertikalen Ozeantemperatur- und Salinitätsprofilen aus Altimetriedaten.
- STEINBACH, Eik: Potenziale und Nutzung der Windenergie in Sachsen.
- VIERTEL, René: Offshore-Windstromerzeugung in Deutschland. Eine systematische Analyse und Bewertung.

---

### Universität Mainz

---

#### *Promotionen*

- BONN, Boris: Bestimmung der Größenverteilung von sekundären organischen Aerosolen aus der Photooxidation biogener Terpene.
- WINTERRATH, Tanja: Numerical Investigations on Atmosphere-Biosphere Interactions-Impact on Radiation Fog and Leaf Surface Water.

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

- JERG, Matthias: Implementation einer hochreichenden Filterung in ein nicht-hydrostatisches mesoskaliges Klimamodell.
- KNIFFKA, Anke: Implementierung eines diffusionsarmen Advektionsschemas in das numerische Modell MISKAM.
- WEIGEL, Ralf: Kalibrierung und Erprobung eines Impaktorsystems zur Bestimmung der vertikalen Größenverteilung von Aerosolpartikeln unter besonderer Berücksichtigung biologischer Teilchen.

---

### Meteorologisches Institut der Universität München

---

#### *Promotionen*

- FRIEDRICH, Katja: Determination of three-dimensional wind-vector fields using a bistatic Doppler radar network.
- ZHU, Hongyan: A minimal three-dimensional tropical cyclone model.

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

- ANWENDER, Doris: Einfluss unsicherer Atmosphärenparameter auf die Ozonmessung mittels Dobson, Brewer und Microtops II.
- KRATZER, Martin: Charakterisierung des Einflusses anthropogener Quellen auf die VOC-Zusammensetzung an der GAW-Station Hohenpeißenberg.
- MECH, Mario: Modellierung von UV-Strahlung auf Empfänger unterschiedlicher Orientierung.
- RIEMER, Michael: Konturenlänge als Diagnostik in der quasigeostrophischen Oberflächendynamik: Simulationen mit dem CASL-Algorithmus.

---

### Universität Graz

---

#### *Diplom-Hauptprüfung*

- BAUMGARTNER, Dietmar J.: Differentielle Optische Absorptions-Spektroskopie (DOAS) zur Messung von atmosphärischen Spurengasen in urbanen Gebieten: Systemkomponenten und Messergebnisse.

---

### Universität Innsbruck

---

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

- HAWRANEK, Veronika: Spatial variability of precipitation measured by the weather radar at Patscherkofel Mountain (Austria).
- LANDL, Barbara: Energy balance of a proglacial lake, Jökulsárlón, Iceland.
- NIEDERHOFER, Roland: Feinstruktur der Stundenwerte des Niederschlags.
- OBERPARLEITER, Carmen: Einfluss von Eingabedaten, Datenaufbreitung und Modellparametern auf die Simulation und Vorhersage des Abflusses mit dem Schneeschmelz-Abflussmodell SRM.
- OHMS, Alexander: Sommerliche Schneefälle im hinteren Ötztal in Zusammenhang mit alpinen und nordatlantischen Wetterlagen.
- REINGRUBER, Klaus: Temperatur- und Windfelder im Achenal.
- RELLA, Stephan: Fog dissipation by artificial heating.
- VILL, Martin: Foehn breakdown with a cold front: Two MAP case studies.

---

### Universität Wien

---

#### **Institut für Meteorologie und Geophysik**

#### *Promotion*

- HAMELBECK, Felix: Konvektive Flüsse über dem BALTEX-Gebiet.

#### *Diplom-Hauptprüfungen*

- AUER, Martin: Betrachtung konvektiver Systeme unter Zuhilfenahme von Meteosat-6 rapid scan während MAP-SOP.
- GRUBER, Wera-Katharina: Paläoklimatische Rekonstruktionen – ein Vergleich zwischen Klimazeugen und Modellrechnungen.
- HIRTLM, Marcus: Optimierte Reduktion des Vorticitytransportes.
- KOTTEK, Markus: Standardisierung globaler Klimadaten.
- SCHMID, Michael: Beiträge zur Theorie des Eliassen-Palm-Flusses im nichtstationären und nichtlinearen Fall mit diabatischen Prozessen.
- SCHNEIDER, Stefan: Der Sonnblick im Vergleich mit Radiosondendaten.
- SKOMOROWSKI, Paul: Verifikation globaler täglicher Satellitenniederschläge über den Alpen.
- SPATZIERER, Manfred: Vergleich der Föhnstruktur in 2 Alpentälern.
- STEPANEK, Reinhard: Vorhersage des Vereisungspotentials für Luftfahrzeuge mit Hilfe eines Limited Area Model (LAM).
- WIMMER, Franz: Ein Vergleich zwischen bodennaher Divergenz und Niederschlag.

**Universität Basel***Promotion*

JAGGI, Markus: Mikrometeorologische Bestimmung des Energiehaushaltes einer Magerwiese in komplexem Gelände.

*Diplom-Hauptprüfungen*

ANDREOTTI, Carlo: Modellierungsansatz zur Niedrigwasserbestimmung in kleinen natürlichen Einzugsgebieten im Tessin.

SCHELBLE, Gabriel: Die Energiebilanz über einer geeigneten Schneefläche.

**ETH Zürich***Promotionen*

DIRREN, Sébastien: Vortex forcing of extratropical disturbances.

FUEGLISTALER, Stefan: Polar Stratospheric Clouds and Arctic Dentrification.

KOCH, Gisela: Lagrangian analysis of stratospheric ozone in mid-latitudes.

LINIGER, Mark A.: Extratropical synoptic structures at tropopause levels.

ZILLIG, Matthias: Dynamics of jet-like flow patterns in the neighbourhood of storms, the tropopause and orography.

**Anschriften der Autoren dieses Heftes**

PROF. DR. JÜRGEN BAUMÜLLER  
Landeshauptstadt Stuttgart  
Amt für Umweltschutz  
Gaisburgstraße 4, 70182 Stuttgart  
E-Mail: u360400@stuttgart.de

DR. DIRK DÜTEMAYER  
Universität Duisburg – Essen,  
Standort Essen  
Institut für Geographie  
Universitätsstraße 5, 45141 Essen  
E-Mail: dirk.duetemeyer@uni-essen.de

DR. CHRISTA ETLING  
Schaumburger Straße 10  
31698 Lindhorst  
E-Mail: christa.etling@t-online.de

PROF. DR. GÜNTER GROß  
Universität Hannover  
Institut für Meteorologie und  
Klimatologie  
Herrenhäuser Straße 2  
30419 Hannover  
E-Mail: gross@muk.uni-hannover.de

PROF. DR. ALFRED HELBIG  
Fach Klimatologie  
FB VI Geographie/Geowissenschaften  
54286 Trier  
E-Mail: helbig@uni-trier.de

DIPL.-MET. WERNER-JÜRGEN  
KOST  
IMA Richter & Röckle, NL Stuttgart  
Hauptstraße 54, 70839 Gerlingen  
E-Mail: kost@ima-umwelt.de

PROF. DR. WILHELM KUTTLER  
Universität Duisburg – Essen,  
Standort Essen  
Institut für Geographie  
Universitätsstraße 5, 45141 Essen  
E-Mail: wiku@uni-essen.de

PRIV.-DOZ. DR. ANDREAS  
MATZARAKIS  
Universität Freiburg  
Meteorologisches Institut  
Werderring 10  
79085 Freiburg  
E-Mail:  
andreas.matzarakis@meteo.uni-  
freiburg.de

PROF. DR. HELMUT MAYER  
Universität Freiburg  
Meteorologisches Institut  
Werderring 10  
79085 Freiburg  
E-Mail: helmut.mayer@meteo.uni-  
freiburg.de

DR. ULRICH REUTER  
Landeshauptstadt Stuttgart  
Amt für Umweltschutz  
Gaisburgstraße 4  
70182 Stuttgart  
E-Mail: u360002@stuttgart.de

DIPL.-MET. CLAUS-JÜRGEN  
RICHTER  
IMA Richter & Röckle, NL Freiburg  
Eisenbahnstraße 43  
79098 Freiburg  
E-Mail: richter@ima-umwelt.de

DR. RAINER RÖCKLE  
IMA Richter & Röckle, NL Freiburg  
Eisenbahnstraße 43  
79098 Freiburg  
E-Mail: roeckle@ima-umwelt.de

**Examina früherer Jahre sind in folgenden Heften veröffentlicht:**

Heft	Prüfungsjahrgang
meteo 0	1968
1/2 71	1969
1/2 71	1970
2 72	1971
1 73	1972
2 74	1973
2 75	1974
1 76	1975
1 77	1976
2/3 78	1977
1 79	1978
1/2 80	1979
2/3 81	1980
3/4 82	1981
1/2 83	1982
2/3 84	1983
2/3 85	1984
2/3 86	1985 1. Teil
4 86	1985 2. Teil
3/4 87	1986
4 88	1987
3/4 89	1988
3/4 90	1989
3/4 91	1990 1. Teil
1 92	1990 2. Teil
2/3/4 92	1991
4 93	1992
1/3 24	1993
4 24	1994
1/2 26	1995
3/4 26	1996
1/2 27	1997
3/4 27	1998
1/2 28	1999
3/4 28	2000
1/4 29	2001

## Bezugsbedingungen von promet

Herausgeber der Fortbildungszeitschrift *promet* ist der Deutsche Wetterdienst (DWD) mit Sitz in Offenbach am Main. Demzufolge erhalten die Mitarbeiter (Meteorologen und Wetterberater) des DWD sowie des Geophysikalischen Beratungsdienstes der Bundeswehr (GeophysBDBw) mit Sitz in Traben-Trarbach *promet* auf dem Dienstweg. Ferner gibt der DWD *promet* kostenlos ab an die fest angestellten wissenschaftlichen Mitarbeiter der meteorologischen Universitätsinstitute in Deutschland. Dabei verbindet der DWD die Hoffnung, dass auch dieser Empfängerkreis sich bereit erklärt, Themen zur Bearbeitung für *promet* zu übernehmen.

Die Verteilung der einzelnen Ausgaben von *promet* an die genannten Empfängerkreise erfolgt zentral durch die Bibliothek des DWD. Wenden Sie sich daher bei Nichterhalt von *promet* bitte direkt dorthin:

DWD/Bibliothek, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main.

Personen sowie Institutionen, die nicht zu dem oben genannten Empfängerkreis gehören, können *promet* wie folgt erhalten:

- durch Kauf eines Einzelheftes,
- durch Abschluss eines Belieferungsabonnements.

Ihre Bestellung richten Sie bitte an die Bibliothek des DWD, die Sie auch über die weiteren Bezugsbedingungen sowie Preise informiert.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass eine Übereinkunft zwischen dem DWD und der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. (DMG) Mitgliedern der DMG ermöglicht, *promet* im Rahmen ihrer Mitgliedschaft kostenfrei zu erwerben. Weitere Einzelheiten können der Internet-Seite: <http://www.dmg-ev.de> entnommen werden.

## Redaktionelle Hinweise für Autoren

### 1 Allgemeines

Promet dient der Fortbildung von Meteorologen und Wetterberatern. Die Beiträge zum Thema des Heftes sollen den neuesten Stand des zu behandelnden Spezialgebietes auf wissenschaftlicher Basis in einer verständlichen und anschaulichen Weise darstellen.

### 2 Textunterlagen

#### 2.1 Textdisketten

Erstellt im Programm Word als DOC-, RTF-, TXT-Dokument oder in einem kompatiblen Programm. Zu jeder auf Diskette erstellten Seite wird ein Ausdruck benötigt.

#### 2.2 Gliederung

Numerierung der Haupt- und Unterabschnitte nach dem Dezimalsystem (1, 1.1, 1.2 ..., 2, 2.1, 2.2. usw.).

#### 2.3 Abbildungen, graphische Darstellungen

Kontrastscharfe und reproduktionsfähige

Vorlagen (Fotos mit Hochglanz, Strichzeichnungen mit schwarzer Tusche und klarer Beschriftung). Legenden zu den Abbildungen auf besonderem Blatt beifügen.

#### 2.4 Formeln, Gleichungen

Auf das Notwendige beschränken, deutlich lesbar mit fortlaufender Numerierung in runden Klammern am rechten Textrand.

#### 2.5 Tabellen

Nur im notwendigen Umfang, klar und übersichtlich, ggf. auch als Abbildungen.

#### 2.6 Literaturzitate

Literaturhinweise im *Text*: ... MÜLLER (1980) ... oder ... (MÜLLER 1980) ...

*Literaturverzeichnis*:

- Autoren in alphabetischer Reihenfolge. Herausgeber werden durch den Zusatz: „Hrsg.“ gekennzeichnet.

– *Zeitschriftenaufsatz*:

KURZ, M., 1982: Zum Einfluss diabatischer Prozesse auf die Frontogenese in Bodennähe. Meteorol. Rdsch., **35**, 21–30.

– *Buch*:

SCHÖNWIESE, C.-D., 1980: Klimaschwankungen. Berlin: Springer-Verlag, 181 S.

### 3 Korrekturen

Autoren, die das Thema des Heftes behandeln, erhalten Fahnenabzüge ihres Beitrages zur Korrektur. Die Umbruchkorrekturen werden von der Hauptschriftleitung durchgeführt.

### 4 Belegexemplar, Fortdrucke

Autoren von Fachbeiträgen erhalten je 5 Belegexemplare des betreffenden Heftes. Zusätzliche Exemplare können gegen Erstattung der Fortdruckkosten bei der Rücksendung der Korrekturen bestellt werden.

**Manuskriptsendungen** werden erbeten:

Deutscher Wetterdienst  
 Hauptschriftleitung Promet  
 Postfach 30 11 90  
 20304 Hamburg  
 Telefon 040 6690-1461  
 Telefax 040 6690-1499  
 E-Mail: hein-dieter.behr@dwd.de

## Bisher erschienene Ausgaben von *promet*

Die Fortbildungszeitschrift *promet* erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. In der Regel sind es 4 Hefte pro Jahrgang. Preis für den vollständigen Jahrgang: 22,50 €; Einzelheft 6,50 €; Doppelheft 13,- €; Dreifachheft 19,50 € zuzüglich MwSt. und Versandkosten.

Bestellungen nur beim Verlag.

Verlagsanschrift: Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach a. M.  
Tel.: 069 8062-4272 / -4270 / -4271  
Fax: 069 8062-4123

\* vergriffene Hefte. Ausleihe in der Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes und in anderen Bibliotheken möglich.

- |                       |   |                       |   |
|-----------------------|---|-----------------------|---|
| Vol. 1, 1971, Nr. 1/2 | Mikro- und Makroturbulenz   | Vol.12, 1982, Nr. 1/2 | Synoptische Meteorologie heute. Zentraler synoptischer Dienst*              |
| Vol. 2, 1972, Nr. 1   | Numerische Vorhersage *   | Nr. 3/4               | Biometeorologie   |
| Nr. 2                 | Satellitenmeteorologie I  | Vol.13, 1983, Nr. 1/2 | Statistische Methoden der Klimatologie                                      |
| Nr. 3                 | Satellitenmeteorologie II   | Nr. 3/4               | Neuere Ergebnisse der Satellitenmeteorologie                                |
| Nr. 4                 | Wolkenphysik  | Vol.14, 1984, Nr. 1   | Das Europäische Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW)          |
| Vol. 3, 1973, Nr. 1   | Das barotrope Modell  | Nr. 2/3               | Maritime Meteorologie   |
| Nr. 2                 | Geschichte der meteorologischen Strahlungsforschung               | Nr. 4                 | Klima und Volkswirtschaft I   |
| Nr. 3                 | Meßtechnik und Automation   | Vol.15, 1985, Nr. 1   | Klima und Volkswirtschaft II  |
| Nr. 4                 | Technoklimatologie  | Nr. 2/3               | Strahlungstransporte in der Atmosphäre                                      |
| Vol. 4, 1974, Nr. 1   | Die Grenzschicht der Atmosphäre*                                  | Nr. 4                 | Klimarelevante Spurenstoffe I   |
| Nr. 2                 | Medizinmeteorologie*  | Vol.16, 1986, Nr. 1   | Klimarelevante Spurenstoffe II  |
| Nr. 3                 | Instrumente und Methoden  | Nr. 2/3               | Hydrometeorologie   |
| Nr. 4                 | Vorhersageprüfung*  | Nr. 4                 | Ozon I  |
| Vol. 5, 1975, Nr. 1   | Agrarmeteorologie heute   | Vol.17, 1987, Nr. 1/2 | Ozon II und III   |
| Nr. 2                 | Die chemische Zusammensetzung der unteren Atmosphäre I, Gase *    | Nr. 3/4               | Mesoskaliges Klima  |
| Nr. 3                 | Die chemische Zusammensetzung der unteren Atmosphäre II, Aerosole | Vol.18, 1988, Nr. 1-3 | Das Max-Planck-Institut für Meteorologie                                    |
| Nr. 4                 | GATE I  | Nr. 4                 | Meteorologie und Klimatologie der Antarktis I                               |
| Vol. 6, 1976, Nr. 1   | GATE II   | Vol.19, 1989, Nr. 1/2 | Meteorologie und Klimatologie der Antarktis II und III                      |
| Nr. 2                 | Die Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre                         | Nr. 3/4               | Reaktive Spurenstoffe in der Atmosphäre                                     |
| Nr. 3                 | Das barokline Modell  | Vol.20, 1990, Nr. 1/2 | Spezielle geophysikalische Verfahren  |
| Nr. 4                 | Die Energetik der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre          | Nr. 3/4               | Fernerkundung in der Meteorologie I   |
| Vol. 7, 1977, Nr. 1   | Radioaktivität der Atmosphäre                                     | Vol.21, 1991, Nr. 1/2 | Fernerkundung in der Meteorologie II  |
| Nr. 2                 | Luftelektrizität I  | Nr. 3/4               | ALPEX - Das Alpine Experiment I   |
| Nr. 3                 | Luftelektrizität II   | Vol.22, 1992, Nr. 1   | ALPEX - Das Alpine Experiment II  |
| Nr. 4                 | Klimaschwankungen   | Nr. 2-4               | Meteorologie der Mittleren Atmosphäre                                       |
| Vol. 8, 1978, Nr. 1   | Aktuelle Probleme der Flugmeteorologie                            | Vol.23, 1993, Nr. 1/2 | Wolkenphysik und Wolkendynamik I  |
| Nr. 2/3               | Anthropogene Klimamodifikation                                    | Nr. 3                 | Wolkenphysik und Wolkendynamik II   |
| Nr. 4                 | Sturmfluten und Seegang I   | Nr. 4                 | Allgemeine Themen   |
| Vol. 9, 1979, Nr. 1   | Sturmfluten und Seegang II  | Vol.24, 1995, Nr. 1/3 | Wettervorhersagedienst I  |
| Nr. 2/3               | Zirkulationsmodelle   | Nr. 4                 | Wettervorhersagedienst II   |
| Nr. 4                 | Stadtklima  | Vol.25, 1996, Nr. 1/2 | Wettervorhersagedienst III  |
| Vol.10, 1980, Nr. 1/2 | Klimamodelle  | Nr. 3                 | Beiträge zur Grundfragen d. Meteorologie                                    |
| Nr. 3                 | Klima und Planung I   | Nr. 4                 | Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg I                         |
| Nr. 4                 | Klima und Planung II  | Vol.26, 1997, Nr. 1/2 | Das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg II                        |
| Vol.11, 1981, Nr. 1   | Meso-scale Modelle  | Nr. 3/4               | Photosmog I   |
| Nr. 2/3               | Transport und turbulente Diffusion von Luftbeimengungen           | Vol. 27, 2001 Nr. 1/2 | Photosmog II  |
| Nr. 4                 | Flugmeteorologische Probleme der planetarischen Grenzschicht      | Nr. 3/4               | Die neue Modellkette des DWD I  |
|                       |   | Vol. 28, 2002 Nr. 1/2 | Die neue Modellkette des DWD II   |
|                       |   | Nr. 3/4               | Numerische Klimamodelle Teil I: Das Klimasystem der Erde                    |
|                       |   | Vol. 29, 2003 Nr. 1-4 | Numerische Klimamodelle Teil II: Modellierung natürlicher Klimaschwankungen |
|                       |   | Vol. 30, 2003 Nr. 1/2 | Umweltmeteorologie  |