promet
Jahrgang 33 Heft 3/4
2007
meteorologische fortbildung
Deutscher Wetterdienst

Biometeorologie des Menschen



promet

Herausgeber
Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter
Dr. Jörg Rapp (Offenbach a. M.)

Redaktionsausschuss
Dipl.-Met. W. Kusch (Offenbach a. M.)

Prof. Dr. G. Adrian (Offenbach a. M.)
Dr. F.-H. Berger (Lindenberg)
Prof. Dr. B. Brümmer (Hamburg)
Prof. Dr. J. Egger (München)
Prof. Dr. F. Fiedler (Karlsruhe)
Prof. Dr. G. Groß (Hannover)
Dr. J. Neisser (Berlin)
Prof. Dr. C.-D. Schönwiese (Frankfurt a. M.)
Prof. Dr. P. Speth (Köln)
Prof. Dr. G. Tetzlaff (Leipzig)

Bildnachweis Titelbild: Fotolia, Bioklimakarte 1971- 2000 Deutscher Wetterdienst

pro*met* erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes – Kaiserleistraße 29/35, 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.

Auflage: 3000

Technische Herausgabe (Layout):
Peter Meyring
Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M.

Druck:
Schedel druck u. media GmbH Co. KG
An der Barget 10
97633 Kleineibstadt

ISSN 0340-4552

Meteorologische Fortbildung

33. Jahrgang, Heft 3/4, 2007

Thema des Heftes:
Biometeorologie des Menschen

Fachliche Redaktion: P. Becker, G. Jendritzky, Freiburg i.Br.
Fachliche Durchsicht: G. Tetzlaff, Leipzig

		Seite
	Zur Einführung	81
	Zu diesem Heft	81
1	G. JENDRITZKY, D. FIALA, G. HAVENITH, C. KOPPE, G. LASCHEWSKI, H. STAIGER, B. TINZ Thermische Umweltbedingungen	83-94
2	P. KÖPKE, M. PLACZEK, H. STAIGER, P. WINKLER Solare UV-Strahlung und ihre Wirkung auf den Menschen	95-108
3	U. SCHLINK, U. KAMINSKI, O. HERBARTH, E. SCHULZ Atmosphärische Schadstoffe und Gesundheit sowie Luftqualität in deutschen Kurorten	109-119
4	H. BEHRENDT, K.-C. BERGMANN, H. BURKHARDT, J. RING, E. SCHULTZ, B. VOGEL, H. VOGEL Allergene Pollen	120-132
5	K. BUCHER, E. WANKA Das Problem der Wetterfühligkeit	133-139
6	P. BECKER, K. BUCHER, G. JENDRITZKY, U. KAMINSKI, C. KOPPE, G. LASCHEWSKI Das Medizin-Meteorologische Informationsangebot für den Gesundheitssektor und die Öffentlichkeit	140-147
7	P. BECKER, K. BUCHER, G. JENDRITZKY, U. KAMINSKI, C. KOPPE, G. LASCHEWSKI Gesundheitsrisiken durch Klimawandel	148-156
	Blick nach draußen Der polnische Wetterdienst (IMGW)	157-160
	Institute stellen sich vor Das Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln	161-166
	H. J. BOLLE Fritz Möller 1906-1983	167-172
	Buchbesprechungen	173
	Habilitationen, Promotionen sowie Diplomhaupt-, Master- und Bachelorprüfungen im Jahr 2006	174-178
	Redaktionelle Hinweise für Autoren	179
	Anschriften der Autoren	180

© Deutscher Wetterdienst 2007

Zur Einführung

Sehr verehrte pro***met****-Leser!*

Nach einer kurzen Pause halten Sie nunmehr wieder ein Heft der DWD-Fortbildungszeitschrift promet in der Hand. Diese Pause hat einen ganz einfachen Grund, es gab einen Wechsel: Anfang 2007 endete eine ausgesprochen konstruktive Phase in der Schriftleitung von pro***met****. Herr Dr. Hein Dieter Behr, der die Zeitschrift im Jahre 1999 mit Ehrgeiz und einer ordentlichen Portion Beharrlichkeit „reanimierte", ging zu diesem Zeitpunkt in den wohlverdienten Ruhestand. Dem ehemaligen Mitarbeiter des Hamburger Seewetteramtes konnte ich bereits anlässlich seiner Verabschiedung aus dem Dienst am 22. Februar 2007 für seine stetige Leistung, seine konsequente Aufbauarbeit und seine gute Ideen sehr herzlich danken. Gern wiederhole ich an dieser Stelle meinen Dank an ihn.*

Am 1. April 2007 übernahm Herr Dr. Jörg Rapp, Mitarbeiter des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach/Main, die Schriftleitung. Ich danke Herrn Dr. Rapp für seine Bereitschaft, diese vielfältige und anspruchsvolle Aufgabe neben seiner eigentlichen Tätigkeit als Meteorologe im Wechselschichtdienst zu übernehmen.

Bei meinem Dank darf ich Frau Elke Roßkamp, ebenfalls vom Seewetteramt Hamburg, nicht vergessen, die in der Vergangenheit das Layout von promet gekonnt und engagiert gestaltet und vor allem mit einer Liebe zum Detail weiter entwickelt hatte. Ihrem Nachfolger, Herrn Peter Meyring aus dem Team der Pressestelle in Offenbach/Main, wünsche ich ebenfalls eine glückliche Hand beim Layout.

Die Vielzahl der in pro***met*** *behandelten Themen unterstreicht stets aufs Neue, dass es gelungen ist, neben DWD-Autoren auch externe Wissenschaftler der verschiedensten Fachrichtungen der Geowissenschaften für einen Beitrag zu gewinnen. Die schon seit 1969 bestehende Fortbildungszeitschrift bietet somit ein ausgezeichnetes Podium, Grundlagenwissen und aktuelle Forschungsergebnisse didaktisch gut aufbereitet darzustellen und weiterzugeben. Ich denke, das Heft ist eine „erste Adresse" für meteorologische Fortbildung im deutschsprachigen Raum.*

Nicht zuletzt aufgrund strategischer Änderungen innerhalb des DWD und der Einführung des Bachelor-Studienganges in der Meteorologie soll die Fortbildungszeitschrift pro***met*** *Schritt für Schritt auch für den nichthöheren Dienst bzw. die Bachelor-Absolventen künftig noch lesenswerter gestaltet werden. Erste Schritte hierzu stellen ein geplantes Heft über „Interaktive Lernprogramme in der Meteorologie" und die Einführung eines Glossars dar. Im Übrigen wird das erfolgreiche Konzept der Themenhefte weiterverfolgt. Ich kann den Leserinnen und Lesern versprechen, dass schon viele interessante Beiträge auf sie warten...*

Dem neuen Schriftleiter, den Fachredakteuren und Fachgutachtern und nicht zuletzt allen Autoren wünsche ich für ihre Arbeit alles Gute und Ihnen als Leserinnen und Lesern stets eine instruktive, gewinnbringende Lektüre.

W. Kusch
Präsident des Deutschen Wetterdienstes

Zu diesem Heft

Die Atmosphäre stellt einen Teil unserer Umwelt dar, mit der sich der Organismus des Menschen dauernd auseinandersetzen muss, um ein Gleichgewicht aller Lebensfunktionen sicherzustellen. Reaktionen des Organismus können deshalb auch als Reizantwort auf Änderungen im physikalischen und chemischen Zustand der Atmosphäre aufgefasst werden. Um den Einfluss der atmosphärischen Umweltbedingungen auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen zu verstehen, muss die rein meteorologische Information zunächst in eine biologisch relevante transformiert werden, mit der die gesundheitsbezogene Bewertung erst gelingen kann. Dies wurde bereits in pro***met*** *3/4'82, in dem die Biometeorologie noch umfassend in den drei Teilgebieten Agrar, Forst und Human abgehandelt wurde, sehr ausführlich anhand der Energiebilanzgleichung dargestellt. Im Grundsatz sind die Ursache-Wirkungsbeziehungen bei der Reaktion des Menschen auf Änderungen in Eigenschaft und Zusammensetzung der Atmosphäre bekannt. Es hat sich dabei bewährt, die atmosphärischen Umweltbedingungen gesundheitsbezogen in drei Wirkungskomplexen zu behandeln: (1) der aktinische Wirkungskomplex mit den direkten Wirkungen der solaren Strahlung, insbesondere im Sichtbaren und im UV-Bereich, (2) der thermische Wirkungskomplex, in dem die Bedingungen der Wärmeabgabe beschrieben werden und (3) die Lufthygiene (überwiegend Gegenstand des staatlichen Immissionsschutzes) einschließlich allergene Pollen und Sporen. Darüber hinaus liefern sogenannte ganzheitliche (holistische) Ansätze (Wetterklassifikationen) reproduzierbare Ergebnisse im Hinblick auf wetterabhängige Gesundheitseffekte. In* pro***met*** *2'74 (Medizinmeteorologie) waren Fragen zur Wetterfühligkeit noch das zentrale Thema.*

Human-Biometeorologie deckt als Teilgebiet der Umweltmeteorologie eine Reihe von Fragen der Umweltmedizin ab. Bei der Untersuchung des Spektrums der Wirkungen werden in der Biometeorologie z. T. die gleichen, z. B. epidemio-

logischen Methoden benutzt, um Schadpotential zu erkennen, um über Grenzen von für die Gesundheit nachteiliger Exposition zu informieren, um Beziehungen zwischen der atmospärischen Umwelt und Erkrankungen sowie Befindensstörungen aufzudecken und um die Rolle der Atmosphäre beim Übergang von Gesundheit zu Krankheit aufzuklären. Hier seien beispielhaft epidemiologische Studien zu den Auswirkungen von Hitze, Kälte, UV-Strahlung, Luftbelastung und Wetteränderungen auf Morbidität (Krankheitsstatistik) und Mortalität (Sterberate) genannt. In der Untersuchung der Beziehung des Menschen zu seiner Umwelt erschweren zahlreiche Störgrößen, wie sozioökonomische Effekte, Demographie, Lifestyle die Aufklärung der Zusammenhänge.

Die Bedeutung der Human-Biometeorologie ist in den letzten Jahren erheblich gestiegen. Inbesondere die Diskussion über den Klimawandel hat das Interesse an biometeorologischen Fragestellungen deutlich gesteigert. Der Hitzesommer 2003 mit europaweit 55 000 der Wärmebelastung zuzuordnenden Todesfällen sowie der ebenfalls sehr warme Sommer 2006 haben hierzu entscheidend beigetragen. Die Biometeorologie hat in diesem Bereich mit der Einführung eines Hitzewarnsystems eine der ersten erfolgreich umgesetzten Anpassungsstrategien geliefert.

Von ebenfalls großer Bedeutung ist die Pollenflugproblematik. Allein in Deutschland ist von zwölf Millionen Betroffenen auszugehen, Tendenz steigend. Mit der Ambrosia ist darüber hinaus eine neue, extrem allergene Pollenart zu beobachten, welche möglicherweise mit dem bereits deutlich erkennbaren Klimawandel eine weitere Verbreitung finden wird.

Auch die zunehmenden Gesundheitsschäden durch UV-Strahlung, verursacht durch eine starke Exposition gegenüber den atmosphärischen Umweltbedingungen aufgrund geänderten Freizeitverhaltens, begründen Arbeitsfelder für die Human-Biometeorologie. Gleiches gilt für die gesundheitliche Bewertung der atmosphärischen Umweltbedingungen und der Entwicklung von Standards für Erholung, Prävention und Rehabilitation.

Im Hinblick auf Risikofaktoren liefert die Biometeorologie des Menschen damit die Basis für die Information und Beratung der Öffentlichkeit und der Entscheidungsträger in Politik und Verwaltung. Allgemeines Ziel ist immer, ungünstige Effekte zu vermeiden oder zumindest zu vermindern, Vorteile aus den positiven Effekten zu ziehen (z. B. im Kurwesen) und die Lebensqualität der Bevölkerung zu erhöhen.

Der Stand der Erkenntnisse auf dem Gebiet des Wettereinflusses auf die Gesundheit erlaubt die Abgabe einer Reihe von Produkten und Dienstleistungen wie Wärmebelastungsvorhersagen und Hitzewarnungen, UV-Index-Vorhersagen, Pollenflugvorhersagen, Medizin-Meteorologische Hinweise. Diese sollen den Kunden ermöglichen, besser mit atmospärischen Belastungen umzugehen. Diese medizin-meteorologischen Informationsangebote basieren auf der spezifischen Anpassung synoptischer Produkte an die Bedürfnisse der Kunden und nutzen auch neue Darstellungsformen und Verbreitungsmöglichkeiten wie Internet und Newsletter.

Nationale Wetterdienste können dazu beitragen, die am besten geeignete Ansätze, Maßnahmen, Technologien und Politiken zu identifizieren, mit denen die Anpassungskapazität an Klima und Klimaänderungen erhöht werden kann. Beispiele hierfür wären integrierte Hitzewarnsysteme und Vorsorgeplanung in Stadtgebieten. Die Bedeutung dieser Themen insbesondere im Zusammenhang mit der Diskussion um die Klimaänderung ist offensichtlich. Ebenso offensichtlich ist, dass Dienstleistungsangebote, die für gute Gesundheit, Sicherheit und Wohlbefinden der Bevölkerung erforderlich sind, deutlich verbessert werden können, wenn existierendes Wissen, Praktiken, Forschung, Technologien aufgegriffen werden, um geeignete biometeorologische Informationen und Beratungen an die Öffentlichkeit und die Entscheidungsträger zu geben, mit dem Ziel eine bestmögliche Anpassung der Bevölkerung an die verschiedenen Aspekte der atmosphärischen Umweltbedingungen zu erreichen.

Vergleicht man den Inhalt dieses Heftes mit den Beiträgen der beiden früheren pro***met****-Hefte, so erkennt man sofort, warum eine erneute, aber neue Darstellung der Biometeorologie des Menschen begründet ist. Die „Thermischen Umweltbedingungen" (Kapitel 1) wurden zwar 1982 sehr detailliert abgehandelt, aber inzwischen gibt es große Fortschritte in der thermophysiologischen Modellierung und in der Anwendung.*

Weder die „UV-Strahlung" (Kapitel 2), noch „Allergene Pollen" (Kapitel 4) als natürliche Luftbeimengung wurden früher thematisiert. Der Bedeutung der anthropogenen Komponente der atmosphärischen Schadstoffe für die Gesundheit und die Luftqualität in den Kurorten widmet sich Kapitel 3. In „Gesundheitsrisiken beim Klimawandel" (Kapitel 7) wird deutlich, an welche Auswirkungen wir uns anpassen müssen. „Das Problem der Wetterfühligkeit" (Kapitel 5) ist nach wie vor von großem Interesse für die Öffentlichkeit, auch im Hinblick auf neure Erklärungsansätze. Wie der Stand des Wissens in operationellen Vorhersagen umgesetzt wird, zeigt „Das Medizin-Meteorologische Informationsangebot für den Gesundheitssektor und die Öffentlichkeit" (Kapitel 6).

P. Becker, G. Jendritzky

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 83-94 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

G. JENDRITZKY, D. FIALA, G. HAVENITH, C. KOPPE, G. LASCHEWSKI, H. STAIGER, B. TINZ

1 Thermische Umweltbedingungen

The Thermal Environment

Zusammenfassung
Die Bewertung und Vorhersage der thermischen Umweltbedingungen des Menschen in einer physiologisch korrekten, wirkungsvollen und praktischen Weise stellt eine der wichtigsten Fragestellungen in der Human-Biometeorologie dar. Dies ergibt sich aus der Notwendigkeit, den Wärmehaushalt des Menschen den thermischen Umweltbedingungen anzupassen, um Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit zu gewährleisten. Ausgehend von der Wärmebilanz des Menschen wird ein Überblick über verschiedene Bewertungsansätze gegeben bis hin zur Entwicklung des „**U**niversellen **t**hermischen **K**lima**i**ndex UTCI" im Rahmen der COST-Aktion 730 (2004). Ausgewählte Anwendungen sollten die Relevanz der thermischen Bewertung im Bereich Wetter/Klima und Gesundheit verdeutlichen.

Abstract
One of the fundamental issues in human biometeorology is the assessment and forecast of the thermal environment in a sound, effective and practical way. This is due to the need for human beings to balance their heat budget to a state very close to his/her thermal environment in order to optimise his/her comfort, performance and health. Based on the human heat budget an overview is given on different assessment approaches up to the development of the "**U**niversal **T**hermal **C**limate **I**ndex UTCI" within COST Action 730 (2004). Selected applications from the weather/climate and human health field should make clear the significance of a thermal assessment.

1 Wärmehaushalt des Menschen, Thermoregulation und Bewertung des thermischen Empfindens

1.1 Die Wärmebilanz

Wärmeproduktion im Organismus und Wärmeabgabe an die Umgebung müssen, zumindest über einen längeren Zeitraum („steady-state"), im Gleichgewicht stehen, um die Körperkerntemperatur auf konstantem Niveau (37 °C) zu halten und damit optimale Funktionen der inneren Organe und des Gehirns zu gewährleisten. Die Temperatur der Körperschale, Haut und Extremitäten, kann dagegen in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen stark schwanken und ist eines der Mechanismen, sich an wechselnde Bedingungen anzupassen. Vom Komfort abweichende Bedingungen werden bewusst und führen so zu Anpassungen des Verhaltens, z. B. durch Veränderung des Isolationswertes der Kleidung, durch Erhöhung bzw. Verminderung der Aktivität und ggf. durch das Aufsuchen von Schutz, wie klimatisierten Räumen. Wärme wird über den Stoffwechsel (Metabolismus = M) aufgrund der Aktivität des Menschen erzeugt, ein – häufig nur geringer – Anteil davon wird zur Erbringung mechanischer Arbeit (W) aufgewendet, z. B. beim Bergsteigen. Die überschüssige Wärme muss an die Umgebung abgegeben werden. Der Körper tauscht Wärme über die Haut durch Konvektion (sensibler Wärmefluss), Strahlung (kurz- und langwellig, sensibel), Verdunstung z. B. von Schweiß und Diffusion von Wasserdampf durch die Haut (latente Wärmeflüsse) und über die Atmung (latent and sensibel) aus. Ein weiterer Mechanismus ist Wärmeleitung (Kontakt mit festen Flächen), der in der Biometeorologie jedoch i. A. nicht berücksichtigt wird. Der Wärmeaustausch zwischen dem Körper des Menschen und seiner thermischen Umgebung (Abb. 1-1) kann in Form einer Energiebilanzgleichung beschrieben werden, der Anwendung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik.

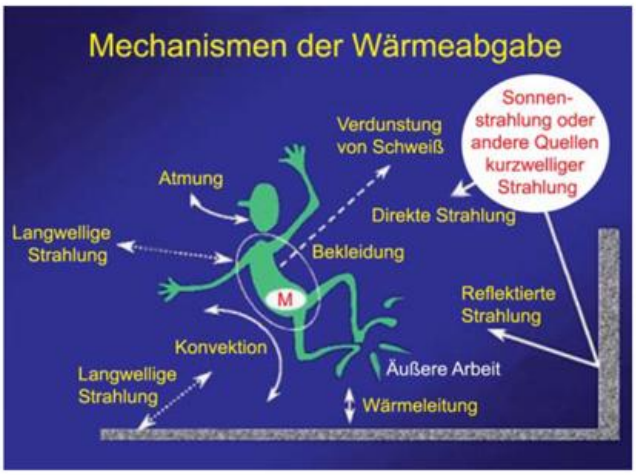


Abb. 1-1: Die Wärmebilanz des Menschen (HAVENITH 2003).

$$M - W - [Q_H(T_a, v) + Q^*(T_{mrt}, v] - [Q_L(e,v) + Q_{SW}(e,v)] - Q_{Re}(T_a, e) \pm S = 0 \quad (1)$$

M Metabolische Rate (Gesamtaktivität)
W Mechanische Leistung (Art der Aktivität)
S Speicherung (Änderung im Wärmeinhalt des Körpers)

Haut:

Q_H Turbulenter Fluss sensibler Wärme
Q^* Strahlungsbilanz
Q_L Turbulenter Fluss latenter Wärme (Diffusion von Wasserdampf durch die Haut)
Q_{SW} Turbulenter Fluss latenter Wärme (Verdunstung von Schweiß)

Atmung:

Q_{Re} Wärmefluss über Atmung (sensibel und latent)

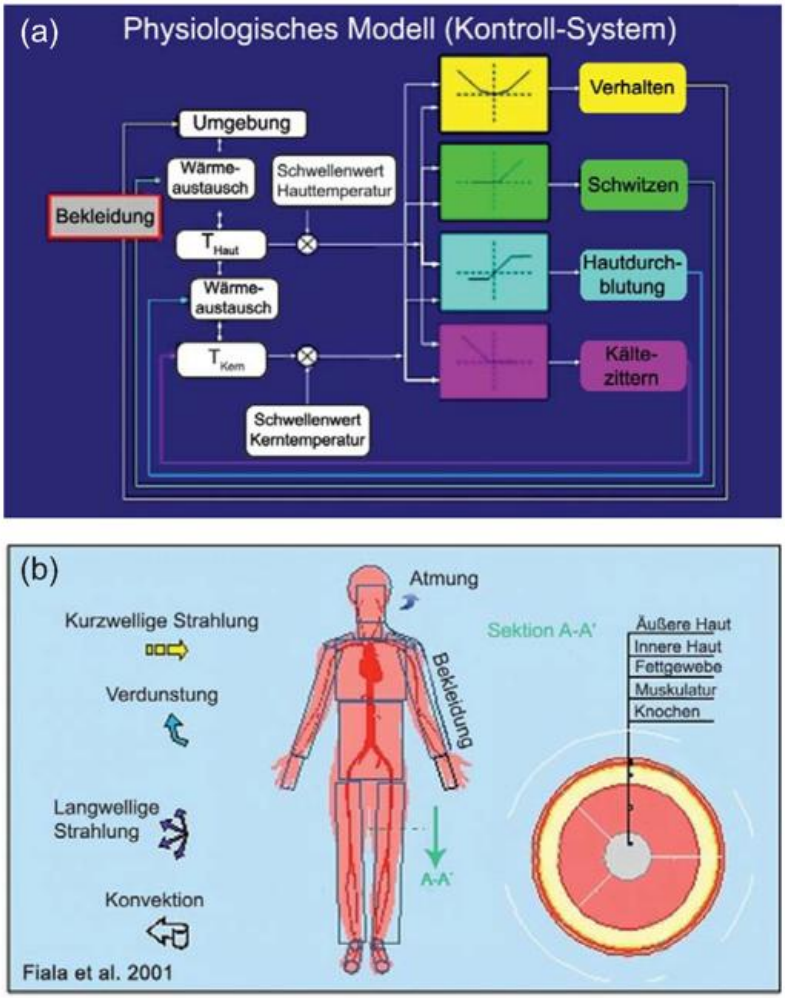


Abb. 1-2: Schematische Darstellung eines physiologischen Modells der Thermoregulation des Menschen (FIALA et al. 2001, HAVENITH 2001), (a) das steuernde System, (b) das passive System.

Die meteorologischen Einflussgrößen sind Lufttemperatur T_a, Wasserdampfdruck e, Windgeschwindigkeit v und mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt}, über die die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse auf den Menschen bezogen werden. T_{mrt} ist - bezogen auf einen Menschen in festgelegter (hier aufrechter) Körperhaltung, gegebenen Werten von Albedo und Emissionskoeffizient der Bekleidung - definiert als diejenige einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umgebung, bei der der gleiche Strahlungsverlust bzw. –gewinn auftritt, wie unter den aktuellen Umgebungsbedingungen. Zusätzlich werden die metabolische Rate (entsprechend der Aktivität und ggf. durch Kältezittern) und die Bekleidungsisolation (Verhaltensanpassung!) benötigt. In Gleichung 1 sind die erforderlichen meteorologischen Variablen den relevanten Wärmeflüssen in Klammern zugeordnet, nicht jedoch die in Wechselwirkung stehenden internen (physiologischen) Variablen wie Hauttemperatur, Kerntemperatur, Schweißrate und Hautbenetzungsgrad. Zur Realisierung einer ausgeglichenen Wärmebilanz verfügt der Organismus über ein komplexes Regulationssystem, dessen zentrales steuerndes System im Hypothalamus des Gehirns lokalisiert ist.

1.2 Thermoregulation

Von einem mathematischen Standpunkt aus kann der Organismus des Menschen in zwei gekoppelte Thermoregulationssysteme eingeteilt werden: (1) das steuernde aktive System, das die thermophysiologischen Reaktionen wie die Verteilung des peripheren Blut- (und damit Wärme-) Flusses von unakklimatisierten Personen, die zusätzliche Wärmeproduktion durch Kältezittern und Schweißproduktion beinhaltet, und (2) das gesteuerte passive System mit den anatomischen Eigenschaften und den Wärmetransportphänomenen innerhalb des Organismus und an seiner Oberfläche (Abb. 1-2). Damit werden die lokalen Wärmeflüsse von den verschiedenen Oberflächensegmenten über freie und erzwungene Konvektion, langwelligen Strahlungsaustausch mit der Umgebung, kurzwelligen Strahlungsgewinn, Verdunstung von Wasser auf der Haut, sowie Wärme- und Massen-Transfer durch uneinheitliche Bekleidung erklärbar.

1.3 Thermisches Empfinden

Die Wärmebilanzgleichung bestimmt die einzelnen Energieflüsse in thermophysiologisch korrekter Weise, beinhaltet jedoch keine Bewertung des thermischen Empfindens. Das thermische Empfinden ist eine subjektive Bewertung der Auswirkung der Umgebungsbedingungen in Hinsicht auf den Zustand von Komfort oder Art und Stärke von Diskomfort. Diskomfort wird bewusst und resultiert in Verhaltensanpassungen mit dem Ziel, thermischen Komfort wieder herzustellen. Aufgrund des unterschiedlichen Metabolismus (hier der Grundumsatz) kann das thermische Empfinden außerhalb des Komforts in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht variieren. Das thermische Empfinden ist ein Integral des thermischen Zustandes der einzelnen Körperabschnitte. Asymmetrische Strahlungsverteilung,

Zug, warme oder kalte Böden sowie vertikale Temperaturgradienten können das thermische Empfinden zusätzlich beeinflussen. Thermischer Komfort stellt sich nur in einem kleinen Ausschnitt des Bereiches von Umgebungsbedingungen ein, in denen die Wärmebilanz (Gleichung 1) ausgeglichen werden kann. Komfort ist mit einem Minimum thermoregulatorischer Aktivität verknüpft. FANGER (1970) hat Personen, die sich ihr ganzes Leben in den Tropen aufgehalten haben, unmittelbar nach Ankunft mit dem Flugzeug in Kopenhagen in Klimakammern Komfortbedingungen aussuchen lassen. Ferner wurden Gruppen untersucht, die über Jahre bei geringer körperlicher Aktivität unter kühlen Bedingungen mindestens 8 Stunden täglich arbeiteten (Fleischverpackung) und eine Gruppe, die im Winter täglich in der See badete.

Die Differenzen in den von diesen Gruppen bevorzugten Umgebungstemperaturen und physiologischen Parameter unter Komfort waren minimal. Das indiziert, dass es offenbar dem Menschen nicht möglich ist sich dahingehend zu adaptieren, wärmere oder kühlere Umgebungsbedingungen für Komfort zu bevorzugen. Daraus folgt als wesentliches Ergebnis, dass die gleichen Komfortbedingungen weltweit angewendet werden können. Dieser Befund bedeutet allerdings nicht, Komfort rein statisch sehen zu dürfen. DE DEAR und BRAGER (2002) konnten z. B. zeigen, dass die bevorzugte Innentemperatur in Abhängigkeit von den erlebten Außenbedingungen der vergangenen Tage variiert, wenn die Bewohner ihre Bekleidung nur frei wählen können. Die Bestimmung von Komfort setzt die Lösung der Wärmebilanzgleichung für gegebene Umgebungsbedingungen, gegebene metabolische Aktivität und gegebenem Isolationswert der getragenen Kleidung voraus.

Bevorzugte Umgebungsbedingungen zu bestimmen, erfordert die Kenntnis des Isolationswertes der Kleidung. Bei weltweit vergleichenden Studien muss berücksichtigt werden, dass die bevorzugte Kleidungsisolation signifikanten Differenzen unterworfen ist, die z. B. von den Außenbedingungen abhängen und damit saisonal variieren können und auch durch den Kulturkreis beeinflusst sind (NICHOLS und HUMPHREY 1972). Unter extremeren warmen oder kalten äußeren Bedingungen wird jedoch häufiger eine Adaptation zu beobachten sein. Menschen, die z. B. gewöhnlich in warmen Klimaten leben und arbeiten, können es eher tolerieren, in heißer Umgebung tätig zu sein und dort auch länger erhöhte Leistungen erbringen, als Personen aus kälteren Klimaten.

Außerhalb des Komfortbereiches tritt dabei im Warmen Adaptation bezüglich einer kontinuierlicheren und auch erhöhten Rate der Schweißsekretion ein, der Salzgehalt des Schweißes wird reduziert. Im Kalten kann durch Adaptation die thermoregulatorische Minderung in der Durchblutung der Körperschale begrenzt sein, wodurch sich zwar der Wärmeverlust an die Umgebung erhöht, jedoch die Arbeitsfähigkeit verbessert wird.

Es existieren mehrere Konzepte, thermischen Komfort und thermisches Empfinden auf der Basis der vorgefundenen Umgebungsbedingungen vorherzusagen. Das durch Untersuchungen in Klimakammern an mehr als 1500 Probanden wohl am besten validierte Verfahren ist die „**P**redicted **M**ean **V**ote" (PMV)-Gleichung von FANGER (1970), das sich anders als viele Indizes über Jahrzehnte als unverändert valide erwiesen hat und auf der auf Komfortbedingungen reduzierten Variante der Wärmebilanzgleichung aufbaut. PMV reicht in der 7-stufigen ASHRAE-Skala (1997) von -3 für kalt bis +3 für heiß und wird häufig noch um die Werte ±4 für extrem ergänzt. PMV ist in einer Vielzahl von internationalen und nationalen Richtlinien eingeführt. Allerdings wird als nachteilig angesehen, dass die Bedeutung der Zahlenwerte sich einem Laien nicht selbständig erschließt.

Ein anderes weit verbreitetes Konzept ist das einer „äquivalenten" Temperatur. Sie ist die Lufttemperatur, die in einer Referenzumgebung herrschen müsste, um das gleiche thermische Befinden wie in der aktuellen Umgebung hervorzurufen. Der Vergleich äquivalente Temperatur zu Lufttemperatur erschließt sich häufig selbständig, besonders in Hinsicht auf extremere Bedingungen. Sie ordnet sich wegen der individuellen Ausgangsbasis jedoch nicht unbedingt in ein einheitliches Verständnis der damit verbundenen Belastung ein. Basis der Berechnung ist in den meisten Fällen die Wärmebilanzgleichung, die für die Referenzbedingung solange iteriert wird, bis die zum Vergleich mit der aktuellen Umgebung gewählten Energieflüsse übereinstimmen. Referenzumgebung und Vergleichsgrößen können je nach Anwendungsbereich sehr unterschiedlich gewählt sein.

Neben der Verwendung nur der Lufttemperatur wurden in den letzten 150 Jahren mehr als 100 einfache thermische Indizes – zumeist Zwei-Parameter Indizes – entwickelt, um die komplexen Bedingungen des Wärmeaustausches zwischen dem menschlichen Organismus und den thermischen Umweltbedingungen vereinfachend zu beschreiben. Für warme Bedingungen bestehen solche Indizes üblicherweise aus Kombinationen von T_a und unterschiedlichen Feuchtemaßen; für kalte Bedingungen werden T_a and v kombiniert. Diese einfachen Indizes haben den Nachteil nur lokal zu vergleichbaren Ergebnissen zu führen - das ist die Ursache für die Vielzahl der Indizes - aber den Vorteil, häufig ohne weitere technische Hilfsmittel wie Computer berechenbar zu sein und von der Bevölkerung und weiteren Interessengruppen (z. B. im Gesundheitswesen) leichter verstanden zu werden (KOPPE et al. 2004). Darüber hinaus sind in vielen Fällen weitere Annahmen z. B. über variable Schwellen in unterschiedlichen Klimaten oder Jahreszeiten notwendig. Wegen ihrer zu einfachen Konstruktion (mit Vernach-

lässigung relevanter Wärmeflüsse oder anderer Einflüsse auf den Wärmehaushalt) können diese Indizes jedoch niemals die grundlegende Anforderung erfüllen, dass jeder gleiche Wert eines Index thermophysiologisch immer das Gleiche bedeutet, unabhängig davon, welche Kombination der meteorologischen Variablen zu diesem Wert geführt hat. Umfassende Übersichten zu diesen Ansätzen findet man z. B. bei FANGER (1970) oder PARSONS (2003).

Zahlreiche Studien haben zeigen können, dass mit bestimmten Wettertypen Mortalitätsanstiege verknüpft sind. Der synoptische Ansatz identifiziert an einem Ort auf der Basis einer statistischen Analyse Tage mit Wettertypen, die meteorologisch homogen im Hinblick auf das gleichzeitige Verhalten von Lufttemperatur, Taupunkt, Bewölkung, Luftdruck und Wind zu den synoptischen Beobachtungsterminen sind. KALKSTEIN et al. (1996) setzen dieses Verfahren erfolgreich in Hitzewarnsystemen (**H**eat **H**ealth **W**arning **S**ystem HHWS) ein. Die Klassifikation muss jedoch für jeden interessierenden Ort gesondert abgeleitet werden.

2 Wärmebilanzmodelle

Die mathematische Modellierung des Wärmeaustausches des Menschen mit seiner Umgebung begann vor etwa 70 Jahren (BÜTTNER 1938). In den letzten vier Dekaden wurden dann detailliertere Modelle entwickelt, die sich spannen über Modelle für Komfort und „steady state" (FANGER 1970), zu Modellen des Gesamtkörpers, die den thermophysiologisch geregelten Wärmeübergang vom Körperkern zur Haut und von der Haut durch die Kleidung zur Atmosphäre (2-Segment-Modelle) für den instationären Zustand, d. h. in der zeitlichen Entwicklung (GAGGE et al. 1986, BLAZEJCZYK 1994, PICKUP und DE DEAR 2000, DE DEAR und PICKUP 2000, MALCHAIRE et al. 2001) oder den „steady state" beschreiben (STEADMAN 1984 und 1994, HÖPPE 1984 und 1999, HORIKOSHI et al. 1995 und 1997) oder für ausgewählte Körperareale ausgelegt sind, wie für den Fuß (LOTENS et al. 1989) oder für Erfrierungen im Gesicht die Wind-Chill-Temperatur (TIKUISIS und OSCZEVSKI 2002 und 2003, SHITZER 2006), siehe Abb. 1-3. Multi-Segment-Modellen der menschlichen Thermoregulation beschreiben die Wärmeflüsse für den Körper in einer Auflösung bis zu 340 Segmenten (STOLWIJK 1971, KONZ et al. 1977, WISSLER 1985, FIALA et al. 1999 und 2001, HAVENITH 2001, HUIZENGA et al. 2001, TANABE et al. 2002).

Die diversen Ansätze wirken sich auf die Einsetzbarkeit der Modelle aus, z. B. in der täglichen meteorologischen Vorhersage, ggf. sogar auf dem Modellgitter der numerischen Wetterprognose. Das PMV von FANGER (1970) sowie die „Apparent Temperature" in der Variante „OUTDOOR" (STEADMAN 1984 und 1979) sind unter den Wärmebilanzmodellen für den Gesamtkörper die Methoden mit dem geringsten numerischen Aufwand. Die instationären 2-Segment-Modelle benötigen eine Integration von mindestens 120 Einminutenschritten, um einen als stationär (steady state) vergleichbaren Zustand zu erreichen. Ähnliches gilt auch für einige der stationären Varianten, deren Iterationsaufwand einen operationellen täglichen Einsatz begrenzt. Die Multi-Segment-Modelle werden in der Forschung und für aufwändige Begutachtungen eingesetzt.

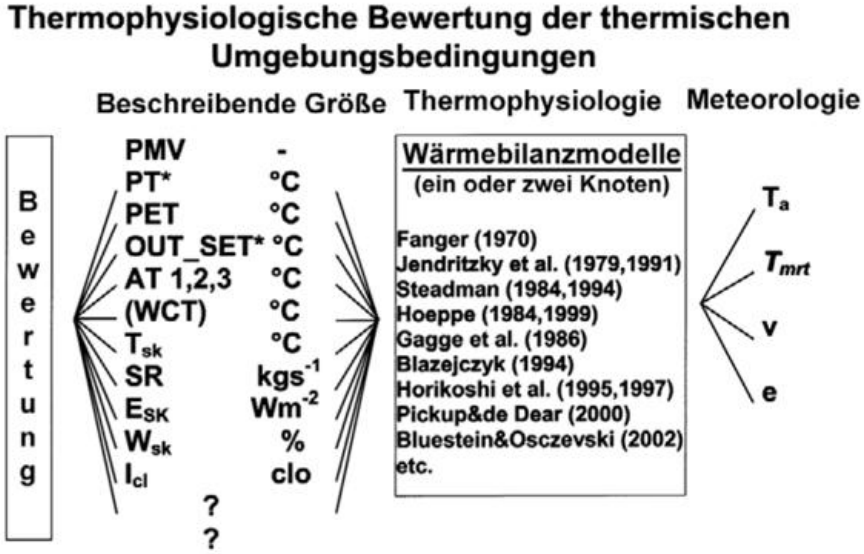


Abb. 1-3: PMV **P**redicted **M**ean **V**ote, PT* Gefühlte Temperatur (**P**erceived **T**emperature), PET **P**hysiological **E**quivalent **T**emperature, OUT_SET* **Out**door **S**tandard **E**ffective **T**emperature, AT **A**pparent **T**emperature, WCT **W**ind **C**hill **T**emperature, T_{sk} mittlere Hauttemperatur, *SR* **S**chweiß**r**ate, E_{sk} Wärmeabgabe über Verdunstung, W_{sk} Hautbenetzungsgrad, I_{cl} Wärmeisolation der Bekleidung, *clo* Bekleidungswert, T_a Lufttemperatur, T_{mrt} mittlere Strahlungstemperatur, *v* Windgeschwindigkeit, *e* Wasserdampfdruck.

2.1 Multi-Segment-Modelle

Die Multi-Segment-Modelle (siehe Abb. 1-2 (b)) simulieren dreidimensional den Wärmetransport innerhalb des Körpers und an seiner Oberfläche, wobei die anatomischen, thermischen und physiologischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Die Wärmeabgabe von Teilen der Körperoberfläche wird unter Berücksichtigung der inhomogenen Verteilung von Hauttemperatur und thermophysiologischer Reaktion über die Oberfläche des Organismus modelliert. Multi-Segment-Modelle sind damit in der Lage, nicht nur die integralen Werte der physiologischen Variablen zu berechnen, sondern auch deren lokale Ausprägungen, z. B. der Hauttemperatur beim der Kälte exponierten Gesicht. Validierungsstudien haben gezeigt, dass

die neuesten Multi-Segment-Modelle über einen weiten Bereich vorkommender thermischer Bedingungen das dynamische Verhalten der Wärmeregulation (einschließlich Schwitzen und Kältezittern) gut reproduzieren (FIALA et al. 2001, 2003, HAVENITH 2001, HUIZENGA et al. 2001). Z. B. ist das passive System des „Fiala"-Modells (FIALA et al. 1999, 2001) eine multisegmentale, mehrschichtige Darstellung des menschlichen Körpers. Jedem der inzwischen 340 Untergliederungen werden geeignete physikalische und thermophysiologische Eigenschaften zugeordnet. Die Daten beziehen sich bzgl. Gewicht, Fettanteil und Oberfläche auf eine Durchschnittsperson. Die physiologischen Daten ergeben den basalen Wärmeanfall und die basale Herzleistung für einen aufrecht stehenden Erwachsenen in thermisch neutraler Umgebung von $T_a = 30$ °C. Unter diesen Bedingungen, bei denen keine Thermoregulation auftritt, berechnet das Modell einen basalen Benetzungsgrad der Haut mit 6 %, eine mittlere Hauttemperatur von 34,4 °C, eine Kerntemperatur (Hypothalamus) von 37,0 °C und eine Rektaltemperatur von 36,9 °C (FIALA et al. 1999 HAVENITH 2001). Verifikations- und Validierungsarbeiten im Rahmen der COST Action 730 (2004) durch Vergleich von Daten aus unabhängigen Experimenten mit Expositionen gegenüber Kältestress, Kühle, Behaglichkeit, Wärme, Wärmebelastung sowie Aktivitäten unterschiedlicher Intensität ergaben in einem weiten Bereich gute Übereinstimmungen mit Messdaten zu physiologischen Reaktionen, wie dem Verhalten von mittlerer und lokaler Hauttemperatur, Schweißrate etc.

Einige dieser Multi-Segment-Modelle haben sich inzwischen zu wertvollen Forschungsinstrumenten entwickelt, mit deren Hilfe ein tieferes Verständnis der Gesetzmäßigkeiten der menschlichen Thermoregulation erlangt werden konnte (FIALA et al. 2001). Gleichwohl sind noch Fragen offen, etwa bzgl. eines noch besseren Verständnisses von Adaptation und ihrer physiologischen Folgen.

2.2 Das Klima-Michel-Modell

Die Komfortgleichung von FANGER (1970) beinhaltet ein vollständiges Wärmehaushaltsmodell reduziert auf die physiologischen Bedingungen für thermischen Komfort und gültig für den stationären Fall. Wegen der Beschränkung auf Komfort setzt die Komfortgleichung dabei voraus, dass der generierte Schweiß vollständig verdunstet wird und eliminiert damit insbesondere die Einflüsse der Permeabilität der Kleidung und des Gradienten zwischen Dampfdruck der atmosphärischen Umgebung und Sättigungsdampfdruck des Schweißes mit der Temperatur der Haut auf den Massefluss von Wasserdampf. Lassen sich die Umgebungsbedingungen mit Komfort nicht vereinbaren, treten Abweichungen von der ausgeglichenen Bilanz auf. Sie sind ein lineares Maß des meteorologisch bedingten Stresses für das Thermoregulationssystem. Die Abweichungen werden mit einem Faktor multipliziert, der ausschließlich von der metabolischen Rate abhängt, die Energieflüsse auf das dimensionslose PMV normiert und damit die Wirkungen der metabolischen Aktivität auf das Komfortempfinden berücksichtigt. Dieser Gesamtansatz ist die Basis für das thermische Bewertungsverfahren Klima-Michel-Modell (JENDRITZKY et al. 1979, JENDRITZKY et al. 1990) des Deutscher Wetterdienstes und der **G**efühlten **T**emperatur GT in °C als einer Variante äquivalenter Temperaturen (STAIGER et al. 1997), die die Anpassung der Bekleidung an die aktuellen thermischen Bedingungen berücksichtigt. Sie gelten jeweils für den aufrecht stehenden Menschen.

Das klassische PMV erreicht im Widerspruch zur gängigen Erfahrung unter belastenden warm-feuchten Bedingungen, bei denen die Einstrahlung häufig bewölkungsbedingt vermindert ist, meist deutlich geringere Werte als unter starker Einstrahlung aber geringer Luftfeuchte (heiß-trockene Bedingungen). Eine Verbesserung der physiologischen Relevanz des PMV unter warm-feuchten Bedingungen ist auf der Grundlage der Arbeit von GAGGE et al. (1986) möglich, indem die im klassischen PMV genutzte Operative Temperatur, dem mit den Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Strahlung gewichteten Mittel aus Luft- und mittlerer Strahlungstemperatur, durch die Effektive Temperatur ersetzt wird, welche die Enthalpie schweißnasser Haut und feuchter Kleidung zusätzlich berücksichtigt. Die Effektive Temperatur ist in den ASHRAE Standards definiert als eine hypothetische Lufttemperatur in einer isothermen Umgebung bei einer relativen Feuchte von 50 %, in der der Mensch den gleichen Hautbenetzungsgrad und den gleichen Wärmeaustausch an der Haut hat, wie in der aktuellen Umgebung, beschrieben durch die Operative Temperatur und den Wasserdampfdruck e der Luft. Man erhält:

$$PMV^* = PMV + dPMV \qquad (2)$$

wobei dPMV den Einfluss beschreibt, mit dem Variationen im Dampfdruck der Atmosphäre auf die Beanspruchung des Thermoregulationssystems wirken. Der Wert von dPMV ist abhängig von den meteorologischen Variablen Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Wasserdampfdruck und mittlerer Strahlungstemperatur. dPMV wurde gültig für den stationären Fall, für einen Gesamtenergieumsatz (metabolische Rate) von 135 W/m^2 und einen Isolationswert der Kleidung von 0,5 clo (Sommerkleidung; 1 clo = 0,155 K m^2 W^{-1}; „korrekter Straßenanzug"), auf der Basis des 2-Segment-Modells von GAGGE et al. (1986) über eine multiple lineare Regression in zusätzlicher Abhängigkeit von PMV parametrisiert. PMV^* bezeichnet also den über den Gagge-Ansatz korrigierten PMV-Wert.

Bei der Verwendung von Gleichung 2 wird für ein gegebenes PMV die Beanspruchung des Thermoregulationssystems höher, wenn der Dampfdruck steigt oder sich aus der Kombination von niedriger Windgeschwin-

digkeit mit einem erhöhten Dampfdruck ein verringerter latenter Wärmefluss von der Hautoberfläche ergibt. Sie wird geringer, wenn bei unveränderter operativer Temperatur der Dampfdruck sinkt.

2.3 Gefühlte Temperatur

Die **G**efühlte **T**emperatur GT ist eine Variante des Klima-Michel-Modells und gehört zur Gruppe der äquivalenten Temperaturen. Sie bietet eine für den Anwender besser verständliche Darstellung der Bewertung des thermischen Empfindens als der klassische PMV-Wert (Abb. 1-4). Der Gefühlten Temperatur liegt, wie oben beschrieben, ein vollständiges Wärmehaushaltsmodell des menschlichen Körpers zugrunde; das Wärme- bzw. Kälteempfinden wird über die Komfortgleichung von FANGER (1972) mit der oben beschriebenen Feuchte-Korrektur nach GAGGE et al. (1986) für den aufrecht stehenden Menschen berechnet. Die Gefühlte Temperatur in °C ist die Lufttemperatur einer Standardumgebung, in der das gleiche Wärme- bzw. Kälteempfinden auftreten würde, wie in der aktuellen Umgebung. In der Standardumgebung ist die mittlere Strahlungstemperatur gleich der Lufttemperatur, und die Windgeschwindigkeit ist auf einen leichten Zug reduziert. Die thermophysiologische Bewertung erfolgt mittels PMV*, Gleichung 2, für einen Norm-Menschen, den Klima-Michel. Dieser erbringt eine Arbeitsleistung von 172,5 W, d. h. etwa 135 W/m² gesamte metabolische Rate bezogen auf die Hautoberfläche. Dies entspricht Gehen mit etwa 4 km/h in der Ebene. Da die Bewertung an Außenbedingungen ausgerichtet ist, kann der Norm-Mensch seine Kleidung zwischen sommerlich und winterlich variieren, um soweit erreichbar thermischen Komfort herzustellen. Sommerliche Kleidung, Kleidungsisolationswert 0,5 clo entspricht einer leichten langen Hose, einem kurzärmeligen Hemd und Sandalen, winterliche, Kleidungsisolationswert 1,75 clo, einem Anzug aus wollenem Material, einer Kopfbedeckung, einem Wintermantel und festen, wärmenden Schuhen.

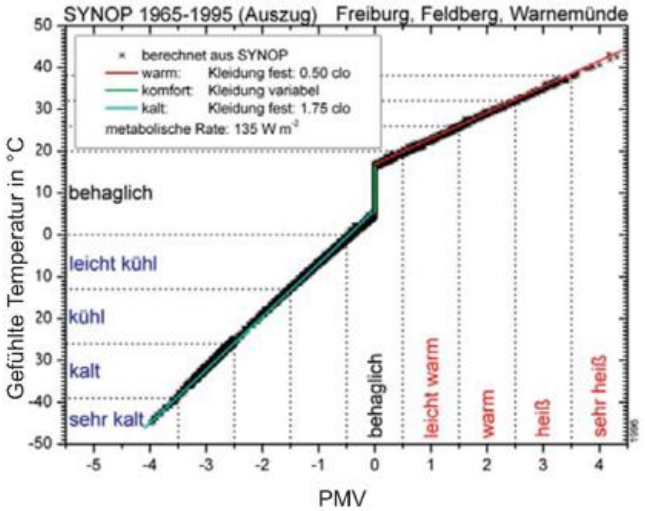


Abb. 1-4: PMV und **G**efühlte **T**emperatur GT.

Gefühlte Temperatur in °C	Thermisches Empfinden	Thermophysiologische Beanspruchung
> +38	sehr heiß	extreme Wärmebelastung
32 bis +38	heiß	starke Wärmebelastung
26 bis +32	warm	mäßige Wärmebelastung
20 bis +26	leicht warm	schwache Wärmebelastung
0 bis +20	behaglich	Komfort möglich
-13 bis 0	leicht kühl	schwacher Kältestress
-26 bis -13	kühl	mäßiger Kältestress
-39 bis -26	kalt	starker Kältestress
< -39	sehr kalt	extremer Kältestress

Tab.1-1: Gefühlte Temperatur, thermisches Empfinden und thermophysiologische Beanspruchung.

Bei Vorliegen der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} beinhaltet das Berechnungsverfahren für GT folgende Schritte:

1) Bestimmung des Isolationswerts der Kleidung (clo) und davon abhängig des PMV (**P**redicted **M**ean **V**ote) durch Iteration der Komfortgleichung nach FANGER (1972).
2) Unter warmen Bedingungen (Kleidungsisolation 0,5 clo erforderlich) Bestimmung einer Feuchte-Korrektur dPMV für das PMV; Effizienz der Wasserdampfdurchlässigkeit der Kleidung konstant 0,42.
3) Regressionsrechnung für die Gefühlte Temperatur mit den unabhängigen, ggf. feuchte-korrigierten Variablen PMV und clo. Das Rechenergebnis weist eine Standardabweichung von etwa 0,5 K auf.

Das Empfinden von thermischem Komfort oder Diskomfort ist nach Tab. 1-1 zu bewerten, welche die bei der jeweiligen Gefühlten Temperatur zu erwartenden thermischen Empfindungen und die dazu korrespondierenden thermophysiologischen Beanspruchungen zeigt.

2.4 Der Wind Chill Temperatur Index

Der **W**ind **C**hill **T**emperatur **I**ndex (WCTI) gehört zur Gruppe der äquivalenten Temperaturen und ist eine Spezialanwendung der Wärmebilanzmodelle für kalte Bedingungen bei gleichzeitig hohen Windgeschwindigkeiten, die den Verzicht auf die Modellierung latenter Wärmeflüsse über die Haut begründen. Das Verfahren konzentriert sich auf die kurzfristige lokale Abkühlung des ungeschützten Gesichtes, um Erfrierungen zu verhindern (TIKUISIS und OSCZEVSKI 2002, 2003; SHITZER 2006). Die für die operationelle Anwendung parametrisierte Formel lautet:

$$WCT = 13{,}12 + 0{,}6215 \cdot T_a - 11{,}37 \cdot v^{0{,}16} + 0{,}3965 \cdot T_a \cdot v^{0{,}16} \quad (3)$$

mit WCTI und T_a in °C, v in km/h, gemessen 10 m über Grund. WTCI ist die Lufttemperatur einer Referenzumgebung mit leichtem Windzug und Strahlungsbedin-

gungen, die Ausstrahlung unter wolkenlosem nächtlichem Himmel entsprechen (ungünstigster Fall). Die Standardperson geht mit einer Geschwindigkeit von 4,8 km/h. WCTI ist nur definiert für Lufttemperaturen unter +10 °C. Das Risiko wird mit der Zeit F_t (**f**rostbite **t**ime) in Minuten beschrieben, ab der mit Erfrierungen im Gesicht zu rechnen ist:

$$F_t = ((-2{,}45\cdot((0{,}667\cdot v)+4{,}8))+2111)\cdot(-4{,}8-T_a)^{-1{,}668} \quad (4)$$

Gleichung 4 ist parametrisiert aus den Differentialgleichungen für die zeitabhängige Änderung der Hauttemperatur. Erfrierungen treten frühestens auf, wenn die Hauttemperatur unter -5 °C sinkt. Der WCTI wurde 2002 von den Wetterdiensten Kanadas und der USA auf eine neue, nun der Physiologie angepasste Basis umgestellt. Im Hinblick auf die Vermeidung des Missverständnisses, dass bei negativer WCTI Gefrieren von Wasser oder Erfrieren von Pflanzen angenommen wird, auch wenn die Lufttemperatur in °C noch positiv ist, wird inzwischen der Zahlenwert als (dimensionsloser) Index WCI verbreitet. Aufgrund der meteorologischen Verhältnisse hat er in Nordamerika eine weite Verbreitung. In Mitteleuropa sind Hauterfrierungen kaum zu erwarten, so dass die Ganzkörpermodelle im Vordergrund stehen.

2.5 Die nahe Zukunft: Der Universelle Thermische Klimaindex UTCI

Obwohl im Grundsatz jedes der oben angesprochenen kompletten Wärmebilanzmodelle für die Bewertung der thermischen Umgebungsbedingungen geeignet ist, wird keines als universeller Standard anerkannt, weder von den Modellierern, noch von den Anwendern. Vor einigen Jahren hat die „**I**nternational **S**ociety on **Bio**meteorology" ISB das Problem des fehlenden Standards erkannt und eine Kommission eingerichtet, um einen universellen thermischen Klimaindex „**U**niversal **T**hermal **C**limate **I**ndex" UTCI zu entwickeln (JENDRITZKY et al. 2002). Seit 2005 konnten diese Aktivitäten durch eine auf Initiative des DWD eingerichteten COST Action 730 (**Co**operation in **S**cience and **T**echnical Development 2004) der Europäischen Forschungsgemeinschaft ESF deutlich verstärkt werden. Ziel ist ein internationaler Standard, der auf den wissenschaftlichen Fortschritten der letzten vier Jahrzehnten in der wirkungsbezogenen thermophysiologischen Modellierung einschließlich der offenen Fragen der Akklimatisation beruht (FIALA et al. 2001, HAVENITH 2001). Die Arbeiten laufen im Rahmen von WMO-CCl (WMO-**C**ommission on **Cl**imatology)-Aktivitäten und werden voraussichtlich 2009 in einer WMO-Guideline namens „The Assessment of the Thermal Environment of Human Beings" frei verfügbar gemacht. Dann kann jeder, der sich mit humanbiometeorologischen Bewertungen befasst, wie insbesondere Wetterdienste, aber auch Universitäten, Einrichtungen des öffentlichen Gesundheitswesens, Epidemiologen, Umweltagenturen, städtische Behörden, Planer usw. für seine spezifischen Zwecke ein Verfahren anwenden, dass dem Stand der Wissenschaft entspricht. Die WMO-Richtlinie soll zahlreiche Anwendungsbeispiele und Lösungen für den Umgang mit den unterschiedlichen meteorologischen Datengrundlagen enthalten.

Der Universelle Thermische Klima-Index UTCI muss folgenden Anforderungen genügen:

- Thermophysiologisch relevant im gesamten Bereich des Wärmeaustausches.
- Anwendbar für Betrachtungen des Gesamtorganismus wie für lokale Abkühlungen (Erfrierungen).
- Gültig in allen Klimaten, Jahreszeiten und Skalen.
- Einsetzbar in den Kernanwendungen in der Humanbiometeorologie.

Anwender aus den folgenden Bereichen werden insbesondere angesprochen:

- Wetterdienste (Vorhersagen). Warnungen vor extremer thermischer Belastung, die Teil eines integrierten HHWS (**H**eat **H**ealth **W**arning **S**ystem) darstellen. Information und Beratung der Bevölkerung für Freizeitaktivitäten, Verhalten, Klimatherapie.
- Öffentliches Gesundheitswesen. Zwecks Verminderung nachteiliger Gesundheitseffekte durch extreme Wetterereignisse (hier Hitze- und Kältewellen) sind Notfallpläne mit geeigneten Interventionsmaßnahmen zu entwickeln, die bei Warnungen aktiv werden.
- Vorsorgeplanung. UTCI-Bewertungen liefern die Basis für einen weiten Bereich öffentlicher und privater Vorsorgeplanung, wie Stadt- und Regionalplanung, im Tourismus, für Klimawirkungsforschung. Die langsam zunehmende Nutzbarkeit von monatlichen und saisonalen Vorhersagen wird auch für eine UTCI-Anwendung interessant.
- Klimawirkungsforschung im Bereich der Gesundheit. Das zunehmende Erkenntnis einer Klimaänderung und der damit zusammenhängenden Auswirkungen auf die Gesundheit erfordert ursache-wirkungsbezogene epidemiologische Untersuchungen. UTCI ist hier das geeignete Bewertungsmodell. Dies gilt auch für die Bewertung der Ergebnisse von Klimaänderungsszenarien einschließlich Down-Scaling im Hinblick auf die Gesundheit des Menschen.

Die Experten der Arbeitsgruppe „Thermophysiologische Modellierung" der COST Action 730 haben mittlerweile festgelegt, das UTCI-Verfahren auf dem Fiala-Ansatz zu gründen, welches dazu in Gemeinschaftsarbeit unter zu Hilfenahme bisher nicht genutzter Daten substantiell weiterentwickelt wird. Das UTCI-Verfahren muss sämtliche oben aufgelisteten Anforderungen in der Anwendung erfüllen. Aus praktischen Gründen wird das äußerst komplexe Fiala-Modell nicht explizit auf Routinebasis angewendet werden können. Deshalb wird das zukünftige UTCI-Verfahren aus einem vereinfachten Modell bestehen, das an das Fiala-

Modell angeeicht ist. Diese ist für alle denkbaren Kombinationen von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, mittlerer Strahlungstemperatur und Bekleidung (Eingangsgrößen wie bei GT) die für die Anwendung relevanten Informationen mit hinreichender Genauigkeit und akzeptablem Rechenzeitverhalten liefern. Dabei wird UTCI (wie z. B. bei GT) die Temperatur einer Referenzumgebung sein, bei der die gleiche thermische Belastung auftritt. Bewertet werden die physiologischen Variablen Kerntemperatur, mittlere und eine lokale (Gesicht) Hauttemperatur, Schweißrate und Kältezittern.

In einem operationellen Verfahren sind die nicht-meteorologischen Variablen metabolische Rate MET und der thermische Widerstand der Bekleidung von besonderer Bedeutung. Die UTCI-Kommission hat als repräsentative Aktivität das Gehen einer Person mit 4 km/h definiert. Dies führt zu einer metabolischen Rate von 2,3 MET (135 W/m²). Bekleidung wird über einen intrinsischen Bekleidungswert im Bereich von Icl = 0,4 - 2,6 clo behandelt. Dieser Bereich sollte die typische Bekleidung für Personen abdecken, die an ihr Lokalklima adaptiert sind. Die Frage der Berücksichtigung spezifischer Eigenschaften von Bekleidung, wie z. B. Ventilation zwischen der Körperoberfläche und der Innenseite der Bekleidung, ist noch offen.

3 Ausgewählte Anwendungsbeispiele

Das Klima-Michel-Modell mit seiner Aussage zur **G**efühlten **T**emperatur GT wird operationell in zahlreichen Anwendungen eingesetzt. Durch den Ansatz HeRATE (**He**alth **R**elated **A**ssessment of the **T**hermal **E**nvironment) (Koppe 2005) kann zusätzlich Akklimatisation und kurzfristige verhaltensgesteuerte Anpassung quantitativ berücksichtigt werden, d.h. die verbesserte Tolerierbarkeit einer meteorologischen Umgebung, die man nicht frei wählen kann. HeRATE modifiziert die festen GT-Schwellenwerte für die unterschiedlichen Belastungsintensitäten durch die (relativen) Erfahrungen der Bevölkerung mit den thermi-

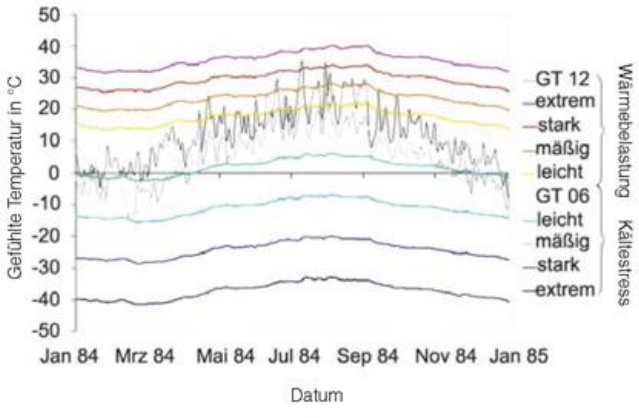


Abb. 1-5: Variable Schwellenwerte für die einzelnen thermischen Belastungsklassen in Baden-Württemberg.

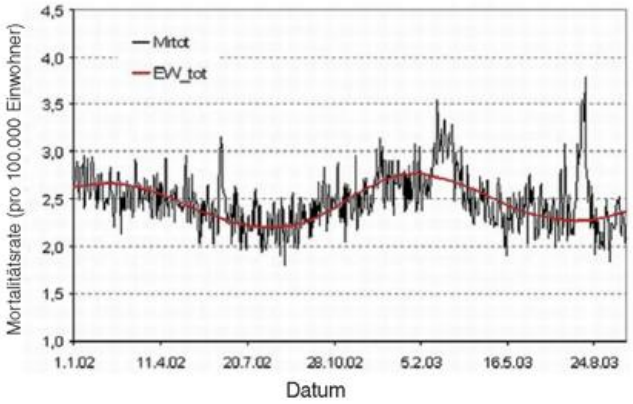


Abb. 1-6: Tägliche Mortalitätsraten MR in Baden-Württemberg 2002 bis Herbst 2003. Rote Linie: Erwartungswert auf Basis eines Gauß-Filters. Auffallend: MR-Gipfel im Juni 2002 (kurze Hitzewelle), Episode im Frühjahr 2003 (im Zusammenhang mit einer Grippe-Epidemie), MR-Spitzen im Juli und insbesondere August durch Hitzewellen (SCHÄR and JENDRITZKY 2004).

-schen Bedingungen (GT) der vergangenen Wochen (Abb. 1-5). Neben dem relativen Teil dieses Ansatzes enthält das HeRATE-Verfahren auch noch einen absoluten Teil, welcher sicherstellen soll, dass nur die Situationen als potentiell belastend eingestuft werden, die bestimmte Minimumkriterien erfüllen. Der konstante, absolute Teil, der mit zwei Dritteln gewichtet wird, berücksichtigt die Tatsache, dass der Organismus des Menschen als eines homoiothermen Lebenswesens seine Körperkerntemperatur mit nur geringen Abweichungen auf einem konstanten Wert halten will. Die zeitabhängige kurzzeitige physiologische Akklimatisation sowie die hier sehr bedeutsame Verhaltensanpassung werden im relativen Teil mit einem Drittel gewichtet. Die Berücksichtigung der thermischen Vergangenheit (Vorgeschichte) wird über die Anwendung eines halbseitigen Gauß-Filters realisiert, wodurch es zu einer realistischen Phasenverschiebung zwischen zeitlicher Anpassung und aktueller Belastung kommt. Damit ist das Klima-Michel-Modell in der letzten Version in der Lage ohne künstliche Festlegungen von Jahreszeiten oder Kalibrierung an das Klima von bestimmten Orten in unterschiedlichen Klimaregionen und zu unterschiedlichen Jahreszeiten mit entsprechend angepassten Schwellenwerten eingesetzt zu werden. Gleichwohl ist der DWD bis heute der einzige nationale Wetterdienst, der routinemäßig ein komplettes Wärmehaushaltsmodell des Menschen für seine vielfältigen Anwendungen in der Biometeorologie einsetzt.

Zahllose epidemiologische Studien weltweit belegen eindrucksvoll die gesundheitlichen Auswirkungen extremer thermischer Bedingungen wie Hitzewellen. Abb. 1-6 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus der Zeitreihe von Mortalitätsdaten aus Baden-Württemberg, die den Hitzesommer 2003 beinhaltet. Während dieses Sommers sind in Europa etwa 55 000 Tote (davon etwa 35 000 allein im August) der Hitze zuzuord-

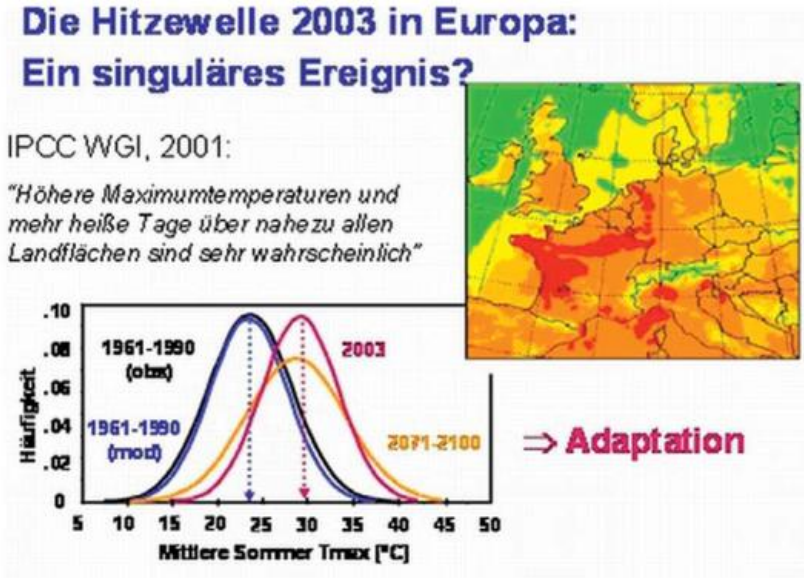


Abb. 1-7: Die Hitzewellen 2003 in Europa: Ein singuläres Ereignis?

nen (KOSATZKY 2005). Das öffentliche Gesundheitssystem war praktisch nirgendwo vorbereitet, ebenso wenig die meisten nationalen Wetterdienste. Bei der Betrachtung der Auswirkungen des Hitzesommers sind zahlreiche bisher ungelöste Fragen aufgetaucht:

- Es existiert keine allgemein anerkannte Definition von Hitzewelle (nach dem oben dargestellten muss eine solche auf einem thermophysiologischen Ansatz beruhen).

- In der Epidemiologie existiert keine einheitliche Definition des Erwartungswertes (Basislinie). Es wurde in Abb. 1-6 ein Filterverfahren zur Erzeugung der Zeitreihe der Basislinie benutzt, dass weit besser geeignet erscheint, als einfache Monatsmittelwerte.

- Es gibt im Grundsatz keine Information über die wirkliche Hitzebelastung der Bevölkerung in unterschiedlichen Stockwerken unterschiedlicher Häuser; es werden einfach die an üblicherweise nicht in den Innenstädten liegenden Wetterstationen bestimmten

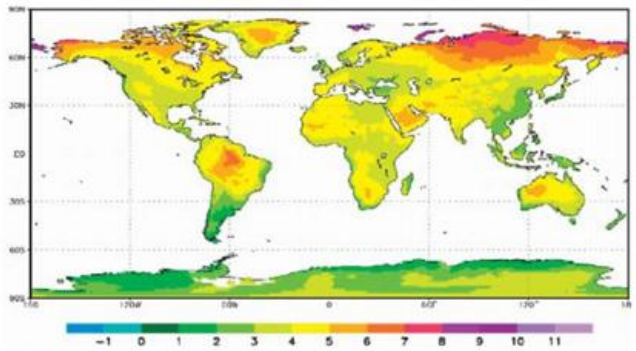


Abb. 1-8: Änderung des Jahresmittels der **G**efühlten **T**emperatur GT in einem zukünftigen Klima (2041-2050) im Vergleich zum Klima 1971-1980 (Kontrolllauf) unter Annahme Immissionsszenario IS92a („business-as-usual"). Zeitscheibenexperiment ECAM4/T106. (Quelle: Deutsches Klimarechenzentrum).

Belastungen auf die Bevölkerung angewandt. Dabei muss jedoch angenommen werden, dass der Effekt der städtischen Wärmeinsel lokal die synoptische Wärmebelastung erhöht. Aber um wieviel?

Basierend auf Simulationen der Klimaänderung mit HIRLAM zeigt die Verteilung der Maximumtemperatur in Basel im Sommer 2003, dass dieser extreme Sommer, wenn die Modellprognose zutrifft, in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts in Mitteleuropa als Normalsommer angenommen werden muss, Abb. 1-7 (BENISTON 2004). Dies ist verträglich mit der Veränderung des Jahresmittelwertes der Gefühlten Temperatur in einem zukünftigen Klima (2041–2050) in Mitteleuropa im Vergleich zum Kontrolllauf (1971–1980), berechnet mit dem Zeitscheibenexperiment von ECHAM4 in T106-Auflösung unter der Annahme des „business-as-usual"-Szenarios (unveränderter CO_2-Ausstoß), Abb. 1-8. Für Mitteleuropa muss im Hochsommer mit einer Erhöhung der Gefühlten Temperatur im Mittel um 3 bis 7 °C gerechnet werden. Der dringende Bedarf, sich darauf einzustellen, ist offensichtlich. Kurzzeitige (Kapitel 3.1) und langfristige (Kapitel 3.2) Anpassungen werden lebenswichtig. Adaptation ist der Schlüsselbegriff.

3.1 Kurzfristige Anpassung

Zahlreiche Menschenleben hätten gerettet werden können, wenn, wie bei den WMO/WHO/UNEP Modellprojekten Rom und Shanghai empfohlen, geeignete Hitzewarnsysteme (**H**eat **H**ealth **W**arning **S**ystems HHWS) 2003 in Europa im Einsatz gewesen wären. Solche Systeme basieren (a) auf der biometeorologischen Vorhersage der Überschreitung eines mit den Gesundheitsbehörden abgestimmten Schwellenwertes für thermische Belastung (Wärmebelastungsvorhersage). Die anschließenden Interventionen (b), die auf einem an die lokalen Bedingungen angepassten Notfallplan beruhen müssen, gehören in die Zuständigkeit des öffentlichen Gesundheitswesens. HHWSs müssen vorsorglich geplant werden mit kompletter Beschreibung aller Abläufe und klarer Festlegung der Schnittstelle zwischen dem nationalen Wetterdienst und dem Gesundheitsbereich (KOPPE et al. 2004, KOVATS und JENDRITZKY 2006, WMO 2004; siehe dazu den Beitrag „Das Medizin-Meteorologische Informationsangebot für den Gesundheitssektor und die Öffentlichkeit", Kapitel 6, in diesem Heft).

Die gesamte HHWS-Prozedur kann in vier mehr oder weniger unabhängige Module unterteilt werden:

1) Die Aufgabe für das öffentliche Gesundheitswesen
   Das wichtigste Modul stellt ein an die lokalen Verhältnisse angepasster Notplan dar, der auf einer spe-

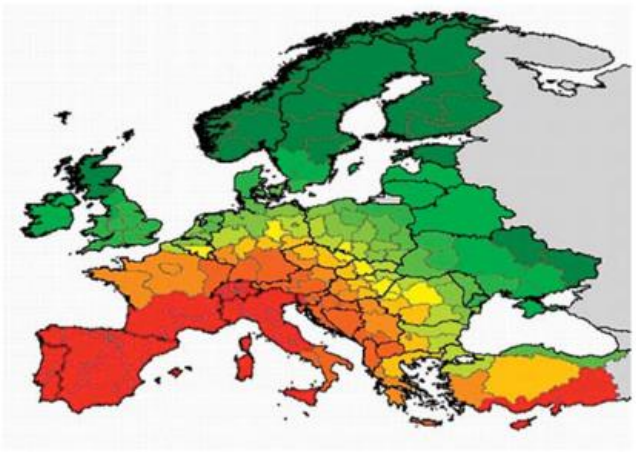


Abb. 1-9: Beispiel einer hypothetischen Fünftages-Vorhersage der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Hitzewelle am 8. August 2003 in Europa.

zifischen Strategie zur Schadensminderung beruht. Dieser Plan wird aktiv, wann immer eine Hitzewarnung ausgegeben wird. Geltungsbereich, Interventionsmaßnahmen, verantwortliche Organe, Entscheidungsträger, Interessensgruppen etc. müssen festgelegt werden. Die bisherigen Erfahrungen mit Versuchen, Hitzewarnsysteme zu implementieren, zeigen deutlich, dass die Entwicklung von geeigneten Interventionsstrategien, die lokale administrative und infrastrukturelle Erfordernisse berücksichtigen, den schwierigste Schritt darstellen.

2) Was heißt Wärmebelastung?
Die Behinderung der Wärmeabgabe des Körpers des Menschen belastet den Organismus. Personen mit eingeschränkter Anpassungskapazität, die nicht vollständig gesund sind, können bei extremer Belastung aus unterschiedlichen Ursachen sterben; die Thermoregulation ist dabei immer betroffen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer gesundheitsbezogene Definition von thermischer Belastung, die im Sinne einer Dosis-Wirkungsbeziehung thermophysiologisch relevant ist.

3) Die Wärmebelastungsvorhersage
Die operationelle Vorhersage extremer Wärmebelastung für die nächsten Tage muss auf Routineprodukten der nationalen Wetterdienste beruhen (Abb. 1-9; siehe dazu wiederum Kapitel 6 in diesem Heft). Die Gesundheitsbehörden geben die Art der gewünschten Warninformation im Hinblick auf Wärmebelastungsintensität und Zeitabläufen vor. Akklimatisation ist zu berücksichtigen. Die Vorhersage von Mortalitätsanstiegen kann nicht als Aufgabe eines nationalen Wetterdienstes angesehen werden (WMO 2004).

4) Epidemiologie
Die Ergebnisse von Korrelationsuntersuchungen zwischen biometeorologischen Bewertungen und Gesundheitsdaten (Mortalität/Morbidität) können sinnvoll für Eichzwecke eingesetzt werden, z. B. um spezifische Schwellenwerte zu definieren. Häufig stellt aber die Verfügbarkeit von gesundheitsbezogenen Datenreihen, die fehlende Expertise und der Mangel an Ressourcen ein unlösbares Problem dar. Das mögliche „Fine Tuning" wäre aber auch nur für das Untersuchungsgebiet gültig. Wissenschaftlich gesehen wäre es natürlich sehr befriedigend von überall verlässliche epidemiologische Ergebnisse zur Verfügung zu haben; für die praktische Anwendung gibt es dafür aber keinen dringenden Grund mehr („Nice to have"). Wann immer eine Hitzewelle auftritt ist es ein gut organisiertes, integriertes Hitzewarnsystem wichtiger als detaillierte Perfektion. In Abb. 1-10 sind einige Ergebnisse von epidemiologischen Untersuchungen zusammengestellt, bei denen die thermischen Belastungen auf GT plus HeRATE basieren. Man erkennt, dass sich die Beziehungen der Mortalitätsrate in den unterschiedlichen Klimaten sehr ähnlich verhalten.

Hitzewarnsysteme (HHWS) können kurzfristig eingerichtet werden. Die zahlreichen erfolgreichen Systeme, die von Kalkstein und seinen Schülern als WMO/WHO/UNEP-Modellprojekte, überwiegend aber in den USA eingerichtet hat, gelten als gute Beispiele für den Wert des Verfahrens, wenn auch die eingesetzten biometeorologische Bewertungsverfahren nicht den oben diskutierten thermophysiologischen Anforderungen genügen.

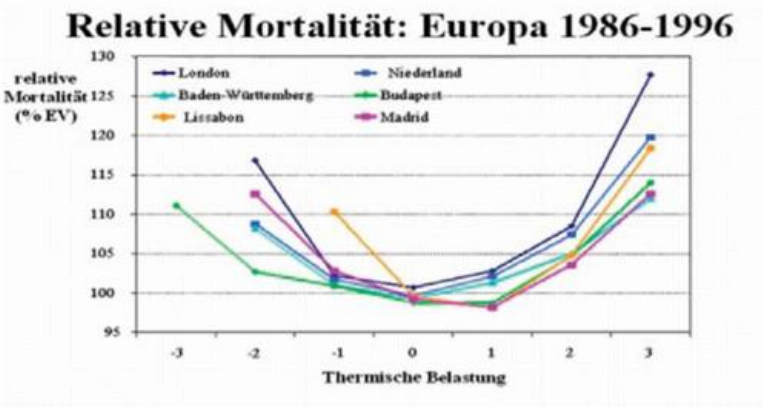


Abb. 1-10: Beispiele epidemiologischer Beziehungen der Mortalitätsrate zu den thermischen Bedingungen.

3.2 Langfristige Anpassung

Das Klima einer Stadt stellt als Ergebnis einer geplanten oder zufälligen Änderung der Landnutzung ein eindrucksvolles Beispiel einer anthropogenen Klimamodifikation dar. Im Hinblick auf das Thema thermische Bedingungen und Gesundheit in der Stadt muss danach die städtische Wärmeinsel UHI (**U**rban **H**eat **I**sland) Gegenstand der Vorsorgeplanung sein. In der umfangreichen Literatur zum Stadtklima basiert die Betrachtung der UHI immer auf dem Unterschied allein der Lufttemperatur zum Umland, statt auf

den Menschen bezogene Bewertungsverfahren zu nutzen. Dabei besteht kein Zweifel daran, dass UHI für die Gesundheit des Menschen bedeutsam sein kann, weil sie nachteilige Gesundheitseffekte durch Exposition gegenüber thermischen Extrembedingungen verursacht. Die städtische Wärmeinsel addiert sich auf die Intensität einer mesoskaligen Hitzewelle, wodurch der Einfluss des Wetters auf Morbidität und Mortalität verstärkt wird. Wenn die UHI als Resultat städtischer Planung angesehen wird, muss sie folglich auch auf zukünftige Planung reagieren. Aber trotz der eindrucksvollen Zunahme stadtklimatologischen Wissens existiert immer noch eine starke Lücke zur Anwendung. Die erforderlichen Methoden unterscheiden sich nach den Zeitskalen. Auf der synoptischen Skala sind Hitzewarnsysteme HHWSs mit geeigneten, lokal angepassten Interventionsstrategien erforderlich, um nachteilige Gesundheitseffekte durch Hitzewellen abzumildern. Für die mittel- bis langfristige Entwicklung des Stadtklimas gilt es Standards für die Stadtentwicklung zu schaffen, das Wissen besser verfügbar zu machen und leichter anwendbare Werkzeuge für die klimabezogene Stadtplanung zu entwickeln. Das würde dem Stadtplaner helfen, sein grundlegendes Ziel zu erreichen: Schaffung und Sicherstellung gesunder Wohn- und Arbeitsbedingungen. Das Problem der globalen Klimaänderung macht vernünftige Stadtplanung umso dringender.

Aus Sicht der Bioklimatologie sind diejenigen atmosphärischen Felder, die die thermischen Bedingungen in der unteren Stadthindernisschicht UCL (Abb. 1-11), dem Lebensraum des Menschen, bestimmen, von Interesse (OKE 1987). Während die Lufttemperatur und auch die Luftfeuchte in der Regel nur sehr geringe Unterschiede zwischen der Sonnen- und der Schattenseite aufweist, zeigt GT, im Wesentlichen durch den Einfluss der Strahlung thermophysiologisch relevante Unterschiede als deutlichen Hinweis für die Planung. Bei Windstille bedeutet die Exposition gegenüber direkter Sonnenstrahlung in der Wärmebilanz etwa soviel, wie ein Anstieg der Lufttemperatur um 15 K. Messungen von ALI-TOUDERT und MAYER (2007) von T_a und T_{mrt}, hier allerdings bewertet mit PET, auf der Nordseite einer O-W-orientierten Straßenschlucht über 32

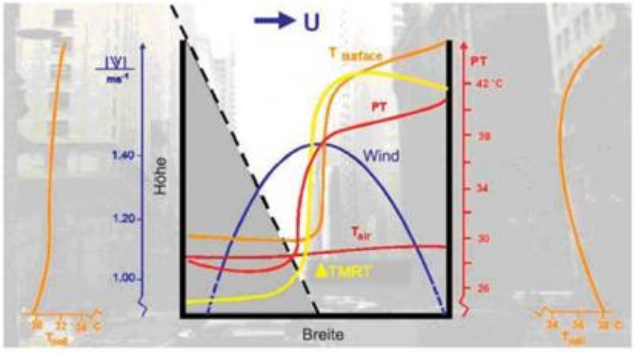


Abb. 1-11: Meteorologische und biometeorologische Bedingungen in einem Straßenquerschnitt mit MUKLIMO2 (GT Gefühlte Temperatur, ΔT_{mrt} Abweichung der mittleren Strahlungstemperatur von der Lufttemperatur T_a).

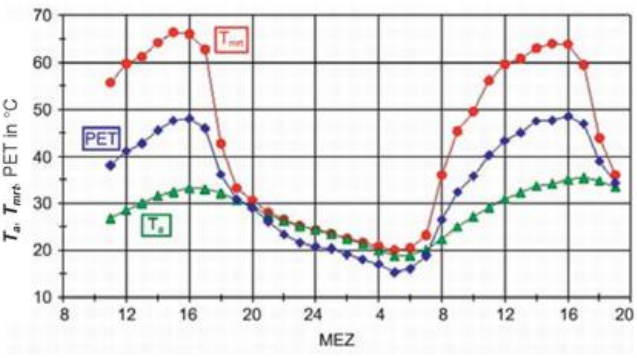


Abb. 1-12 T_a Lufttemperatur, T_{mrt} mittlere Strahlungstemperatur, PET Physiologisch-äquivalente Temperatur auf der Nordseite einer O-W-orientierten Straßenschlucht in Freiburg i.Br. am 14. und 15. Juli 2003.

Stunden bei „Strahlungswetter" zeigen tagsüber ebenfalls den beherrschenden Einfluss der mittleren Strahlungstemperatur auf die thermische Bewertungsgröße (Abb. 1-12) und bestätigen damit die Ergebnisse der Modellrechnungen mit MUKLIMO2.

Für Zwecke der Stadtplanung scheint die Modellierung die Methode der Wahl, weil damit unterschiedliche Planungsalternativen durchgespielt werden können. Geeignete Stadtklimamodelle mit hoher Auflösung sind rechenzeitaufwendig und verlangen Kenntnisse, die ein Anwender in der Regel nicht besitzt. Für praktische Anwendungen in der Stadtplanung wurde deshalb im DWD als ein Expertensystem das **U**rbane **Bio**klim**a** Modell UBIKLIM (GRAETZ et al. 1992, FRIEDRICH et al. 2001) entwickelt, das verfügbares Wissen aus der Stadtklimatologie in einem objektiven Verfahren verwertet. Unter Nutzung von GIS Techniken simuliert UBIKLIM die thermischen Bedingungen in der Stadthindernisschicht, die durch die Art der Landnutzung, d. h. der Siedlungsstruktur (die Planungsvariablen werden in Grenzschichtvariablen transformiert), gegeben ist. Wechselwirkungen zwischen benachbarten Strukturen und der Topographie werden empirisch ebenso berücksichtigt, wie meso- und makroskalige Klimabedingungen. Das Beispiel in Abb. 1-13 zeigt, wie sich innerhalb der Stadt Berlin die Wahrscheinlichkeit

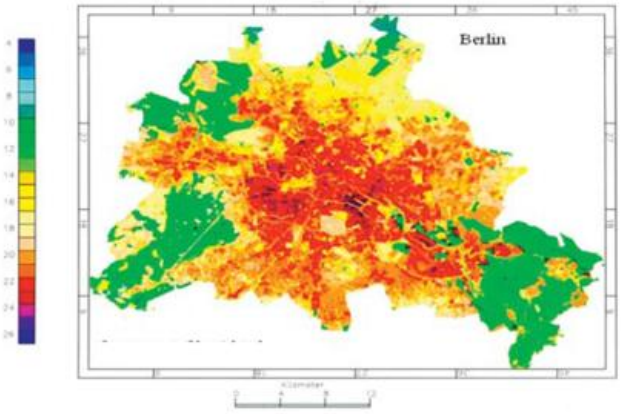


Abb. 1-13: Häufigkeit von Wärmebelastung in Tagen pro Jahr in Berlin auf Basis von UBIKLIM-Simulationen im 10-Meter-Raster.

für das Auftreten von Wärmebelastung (auf Basis GT, nicht T_a) räumlich differenziert ausprägt, worin der Einfluss der unterschiedlichen Landnutzungen zum Ausdruck kommt.

Neben der Notwendigkeit, durch Planungsmaßnahmen die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel UHI (eigentlich des Wärmeinselarchipels) zu verringern, müssen als bisher unterschätztes Problem auch die thermischen Belastungen in den Innenräumen vermindert werden, zumal der Mensch sich in unseren Klimabedingungen überwiegend in Innenräumen aufhält. Dazu braucht es eine intelligente Architektur, die jetzige und zukünftige Gegebenheiten des Klimas durch Kontrolle der Abschattungsmöglichkeiten, Ventilation, Materialwahl, passive Kühlung etc. berücksichtigt.

Ausgewählte Literatur

ALI-TOUDERT, F., MAYER, H., 2007: Thermal comfort in an east-west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions. *Theor. Appl. Climatol.* **87**, 223-237.

BENISTON, M., 2004: The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophys. Res. Letters* **31**, 1-4.

COST Action 730, 2004: Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for Assessing the Thermal Environment of the Human Being. MoU of COST Action 730, 17 S., www.utci.org.

DE DEAR, R.J., BRAGER, G.S., 2002: Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55, *Energy Bldgs* **34**, 549-561.

FANGER, P.O., 1970: Thermal Comfort, Analysis and Application in Environmental Engineering. *Danish Technical Press, Copenhagen.*

FIALA, D., LOMAS, K.J., STOHRER, M., 1999: A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. *Journal of Applied Physiology* **87**, (5), 1957-1972.

FIALA, D., LOMAS, K.J., STOHRER, M., 2001: Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.* **45**, 143-159.

GAGGE, A.P., FOBELETS, A.P., BERGLUND, P.E., 1986: A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans.* **92**, 709-731.

HAVENITH, G., 2001: An individual model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response, *Journal of Applied Physiology* **90**, 1943-1954.

HÖPPE, P., 1999: The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol.* **43**, 71-75.

JENDRITZKY, G., SÖNNING, W., SWANTES, H.J., 1979: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung („Klima-Michel-Modell"). *Beiträge d. Akad. f. Raumforschung und Landesplanung* **28**, Hannover.

KOPPE, C., KOVATS, S., JENDRITZKY, G., MENNE, B., 2004: Heat-waves: risks and responses. World Health Organization, Health and Global Environmental Change, Series, 2, Copenhagen, Denmark.

KOPPE, C., 2005: Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **226**, Offenbach.

KOVATS, S.R., JENDRITZKY, G., 2006: Heat-waves and Human Health. In: MENNE, B., EBI, K.L. (eds.): Climate Change and Adaptation Strategies for Human Health. *Steinkopff*, Darmstadt, 63-97.

PARSONS, K.C., 2003: Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. *Taylor & Francis*, London, New York, 527 S.

SCHÄR, C., JENDRITZKY, G., 2004: Hot news from Summer 2003. *Nature* **432**, 2 Dec 2004, 559-560.

WMO, 2004: Proceedings of the Meeting of Experts to Develop Guidelines on Heat/Health Warning Systems. WCASP 63, WMO-TD 1212, Geneva.

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 95-108 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

P. KÖPKE, M. PLACZEK, H. STAIGER, P. WINKLER

2 Solare UV-Strahlung und ihre Wirkung auf den Menschen

Solar UV-radiation and its effect on humans

Zusammenfassung
Die Eigenschaften solarer UV-Strahlung sowie des **UV-I**ndex (UVI) und ihre Abhängigkeit von astronomischen und meteorologischen Parametern werden beschrieben, die globale Verteilung des UVI zu verschiedenen Jahreszeiten und unter Berücksichtigung des Antarktischen Ozonlochs gezeigt und die Entwicklung in Vergangenheit und Zukunft angesprochen. Weiter werden die für die menschliche Gesundheit wichtigen Aspekte der UV-Strahlung wie Exposition und Hauttyp diskutiert und die UV-Wirkung in der Zelle sowie die resultierenden Hauterkrankungen vorgestellt.

Abstract
Properties of solar UV-radiation and **UV-i**ndex (UVI) are shown as well as their relation to astronomical and meteorological parameters. Global maps of the distribution of UVI for different seasons, including ozone hole effects are presented, and the development in the past and for the future is mentioned. Aspects of UV-radiation which are of relevance for the human health, like exposition and skin type, are discussed and the UV-influence in skin cells and the resulting types of skin disease are presented.

1 Einleitung

Die ultraviolette UV-Strahlung, d. h. elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen die kürzer sind als die des sichtbaren Lichts, macht nur wenige Prozent der solaren Strahlung an der Erdoberfläche aus. Da die UV-Strahlung jedoch durch die hohe Energie der einzelnen Photonen in der Lage ist, in verschiedenen Molekülen Bindungen zu zerstören, hat sie wesentlichen Einfluss auf biologische Systeme, auf verschiedene künstliche Materialien und ist ein wichtiger Parameter bei luftchemischen Prozessen. UV-Strahlung wird als Auslöser für verschiedene Hautkrebse angesehen. Deren Zunahme in den achtziger Jahren mit der parallelen Zunahme der UV-Strahlung und der Entdeckung des Ozonlochs führte deshalb zu intensiver Forschung in diesen Gebieten, sowohl bezüglich der Einstrahlung und ihrer Variabilität als auch zur Wirkung auf die Zelle, auf den Menschen.

Die Haut unterliegt als Grenz- und Kontaktorgan in ganz besonderem Maß dem Einfluss von Umweltfaktoren, unter denen UV-Strahlung eine wesentliche Rolle spielt. Es gibt eine Reihe von Hauterkrankungen, die hierdurch ausgelöst oder verstärkt werden können. Dies kann direkt geschehen wie z. B. bei der Dermatitis solaris (Sonnenbrand) oder, begünstigt durch photosensibilisierende Substanzen, bei der phototoxischen oder photoallergischen Dermatitis. Von diesen sich nach Sonnenbestrahlung mehr oder weniger rasch entwickelnden Krankheitsbildern abzugrenzen sind Reaktionen mit jahre- oder jahrzehntelanger Latenz, wie die Hautalterung, oder - bedeutsamer - das Auftreten von bösartigen Hauttumoren, die schwerwiegende Folgen für die menschliche Gesundheit haben. In vielen Fällen führen auch hier bestimmte Substanzen (Photosensibilisatoren) zu einer gesteigerten Strahlungsempfindlichkeit.

2 UV-Strahlung: Eigenschaften und Prozesse in der Atmosphäre

Ultraviolette Strahlung wird traditionell in die Bereiche UV-A (315 - 400 nm), UV-B (280 - 315 nm) und UV-C (100 - 280 nm) eingeteilt. Diese Trennung resultiert aus der unter-schiedlichen Beeinflussung der solaren Strahlung durch die Ozonabsorption. Durch das atmosphärische Ozon wird im UV-C praktisch alle Strahlung auf dem Weg durch die Atmosphäre herausgefiltert, während UV-A nur wenig von der Dicke der Ozonschicht abhängt. Im UV-B, wo Strahlung in merklicher Menge den Boden erreicht, ist die Ozonabsorption so stark, dass geringe Änderungen der Ozonschichtdicke deutliche Änderungen der Strahlung hervorrufen. Dieser Effekt, der auf die im biologischen

Bereich wirksame Strahlung durchschlägt, ist der Grund, warum die Diskussion der UV-Strahlung und ihrer Wirkungen häufig direkt mit der Änderung der Ozonschichtdicke verknüpft wird

2.1 UV-Index

UV-Strahlung wird üblicherweise als Strahlungsflussdichte (W/m²) auf einen horizontal orientierten Empfänger (UV-Globalstrahlung) angegeben. Bei der Behandlung von umweltrelevanten Strahlungsprozessen ist einerseits eine spektrale Betrachtung nötig, da diese wellenlängenabhängig verlaufen und auch die Strahlung jeder Quelle selbst wellenlängenabhängig ist. Andererseits müssen über die Wellenlänge integrierte Größen betrachtet werden um den Effekt der Strahlung zu beschreiben, der durch das ganze Spektrum hervorgerufen wird. Die Wirkung von Strahlung auf Organismen oder in der Photochemie wird bestimmt durch die Energie, die der Empfänger absorbiert und die damit für andere Prozesse zur Verfügung steht. Das bedeutet, dass sowohl die spektralen Eigenschaften der Strahlung als auch diejenigen des jeweiligen untersuchten Prozesses berücksichtigt werden müssen, d. h. die spezifischen Absorptionseigenschaften der bestrahlten Substanz.

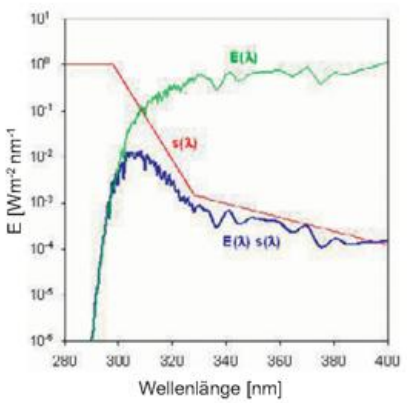


Abb. 2-1: Solare Bestrahlungsstärke E(λ), Erythem-Wirkungsspektrum s(λ) und gewichtete spektrale UV-Strahlungsflussdichte E(λ)· s(λ).

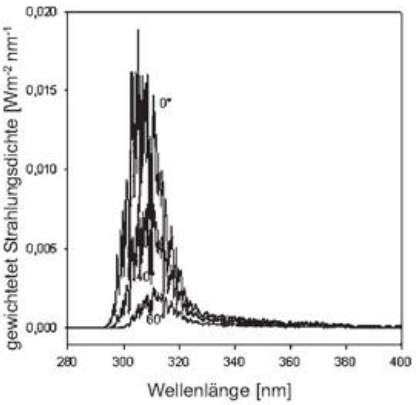


Abb. 2-2: Spektrale erythemgewichtete UV-Strahlungsflussdichte E(λ) · s(λ) für drei Sonnenzenitwinkel.

Im Folgenden wird die für den Menschen wirksame UV-Strahlung behandelt. Da die Entzündungsreaktion der Haut (Sonnenbrand = Erythem) hierfür ein leicht erkennbares Merkmal darstellt, wird zur Beschreibung der Empfängereigenschaften das Erythem-Wirkungsspektren $s_{ery}(\lambda)$ verwendet, das die relative spektrale Empfindlichkeit menschlicher Haut in Bezug auf UV-Erythembildung (Sonnenbrand) wiedergibt. Basierend auf einer Vielzahl von Messungen wurde es mit einem geglätteten Verlauf unabhängig vom Hauttyp (siehe Kapitel 3.1) festgelegt (Tab. 2-1), und zwar normiert und damit dimensionslos.

λ in nm	s_{ery} (λ)
λ ≤ 298	1
298 ≤ λ ≤328	$10^{0{,}094\,(298-\lambda)}$
328 ≤ λ ≤400	$10^{0{,}015\,(139-\lambda)}$

Tab. 2-1: Wirkungsfunktion des UV-Erythems.

Abb. 2-1 zeigt, in logarithmischem Maßstab, den spektralen Verlauf des Erythem-Wirkungsspektrums $s_{ery}(\lambda)$, ein Beispiel für die spektrale solare Strahlungsflussdichte E(λ), und deren Multiplikation zur Beschreibung der erythemwirksamen Strahlung. Auffallend ist deren Konzentration auf einen Spektralbereich um 310 nm, die einerseits durch den Abfall der Strahlung zu kleineren Wellenlängen hin und andererseits durch den der Wirkungsfunktion i größeren Wellenlängen hervorgerufen wird.

Abb. 2-2 zeigt die spektrale erythemwirksame Strahlungsflussdichte mit linearer Skala, so dass die Fläche unter der Kurve die wirksame spektral integrierte Strahlungsflussdichte E_{ery}

$$E_{ery} = \int E(\lambda) \cdot s_{ery}(\lambda) \cdot d\lambda \qquad (1)$$

angibt. Deutlich ist der starke Anteil der UV-B-Strahlung, es zeigt sich aber, dass auch die UV-A-Strahlung bei der Erythembildung eine Rolle spielt.

Für die Information der Öffentlichkeit wurde von der WMO bereits 1994 eine Maßzahl eingeführt, die von der **C**ommission **I**nternationale de l`**E**clairage (CIE 2002) übernommen wurde, der **UV-I**ndex (UVI). Dieser wird gebildet, indem der Wert von E_{ery} in W/m² mit dem Faktor 40 mit der Einheit 1/(W/m²) multipliziert wird. Damit ist der UVI eine dimensionslose Kennziffer mit handlichen Zahlenwerten, die die solare UV-Strahlung unter Berücksichtigung der Prozesse in der Atmosphäre und auch der Wirkung in der menschlichen Haut beschreibt. Für europäische Verhältnisse und Meeresniveau liegen die Werte des UVI zwischen 0 und 10, aber global kann er Werte bis 20 erreichen. Da die Wichtung $s_{ery}(\lambda)$ mit konstanten Werten erfolgt, ist der UVI eine Größe, die die Stärke der solaren UV-Strahlungsflussdichte beschreibt. Damit wird er generell verwendet und nicht nur zur Angabe der maximalen täglichen UV-Strahlung auf einen horizontalen Empfänger, wie es in der ursprünglichen Definition vorgesehen war.

2.2 Abhängigkeit von Atmosphärenparametern

Wie jede solare Strahlung wird auch die UV-Strahlung auf ihrem Weg durch die Atmosphäre durch die darin befindlichen Bestandteile gestreut und absorbiert (KOEPKE et al. 2002) und somit reduziert, aber auch über den Himmel verteilt. Die Stärke dieser Effekte steigt mit der optischen Dicke und mit der Länge des

Weges, den die Photonen zurücklegen. Beispiele für die optischen Dicken der atmosphärischen Bestandteile im UV zeigt Abb. 2-3. Generell gilt, dass diese mit abnehmender Wellenlänge stark zunehmen. Die stets vorhandenen Luftmoleküle beeinflussen die UV-Strahlung durch ihre im Gegensatz zu dem sichtbaren Spektralbereich sehr starke Streuung. Nicht dargestellt in der Abbildung sind Wolken, die nahezu spektral unabhängige optische Dicken zwischen 0,5 (Zirren) und größer als 50 (Gewitterwolken) aufweisen.

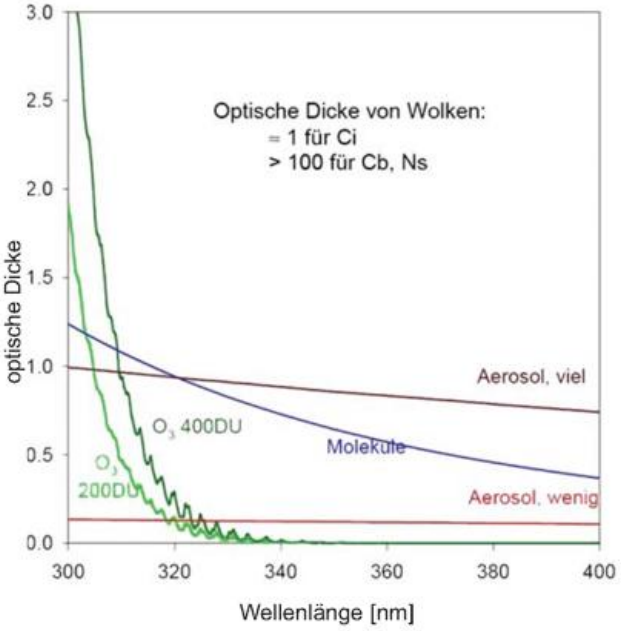


Abb. 2-3: Optische Dicke von Atmosphärenbestandteilen im UV Spektralbereich.

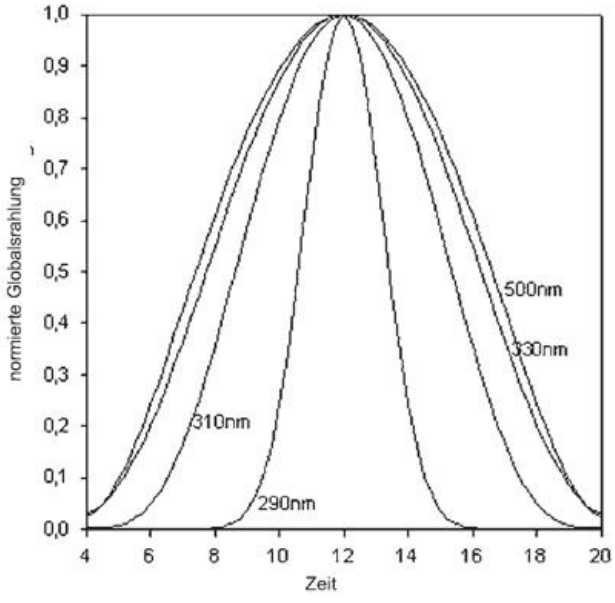


Abb. 2-4: Tagesgang der Globalstrahlung bei vier Wellenlängen jeweils normiert auf den Wert bei Sonnenhöchststand. Werte für die Bedingungen Meereshöhe, Vegetation, wolkenloser Himmel, mittlere Trübung und 330 DU Ozon. Die Zeitangaben gelten für einen Ort bei 50° nördlicher geographischer Breite zur Sommersonnenwende. Die Zahlen an den Kurven geben die Wellenlängen an.

2.2.1 Einfluss des Sonnenstandes

Der Einfluss des Sonnenzenitwinkels führt, unabhängig von den Eigenschaften der Atmosphäre, zu Tagesgang und Jahresgang des UVI. Mit zunehmendem Sonnenzenitwinkel sinkt die Strahlungsflussdichte und das Maximum wird zu größeren Wellenlängen verschoben (Abb. 2-2), da die Zunahme der optischen Dicke mit abnehmender Wellenlänge die Transmission dort schneller zurückgehen lässt. Im UVI werden beide Effekte automatisch berücksichtigt. Eine Änderung des Sonnenstandes von $\theta = 0°$ auf 80° bewirkt bei 400 nm eine Schwächung der Globalstrahlung um einem Faktor von rund 10, bei 310 nm ruft die gleiche Änderung des Sonnenstandes dagegen eine Schwächung um rund 100 hervor. Dies ist die Ursache dafür, dass die UV-Strahlung in den Tagesrandzeiten viel schneller abnimmt als die sichtbare Strahlung, wie in Abb. 2-4 gezeigt. Umgekehrt ist dies der Grund für die Empfehlung, in der Mittagszeit einen Aufenthalt in der Sonne, und damit UV-bedingte Schäden, zu vermeiden.

2.2.2 Einfluss von Ozon

Ozon absorbiert im UV-Spektralbereich, mit sehr starker Zunahme zu kurzen Wellenlängen (Abb. 2-3), und hat damit wesentlichen Einfluss auf die für den Menschen wichtige UV-Strahlung. Dominant ist dabei die Gesamtmenge des Ozons über dem Beobachter, angegeben als Ozonschichtdicke in **D**obson **U**nits (DU). Die Höhenverteilung des Ozons, sowie die Variation seiner Absorptionseigenschaften mit Druck und Temperatur, können demgegenüber vernachlässigt werden. Die Ozonverteilung auf der Erde ist breitenabhängig und variiert außerhalb der tropischen Bereiche, wo die Ozonschichtdicke mit Werten um 240 DU immer relativ gering ist, mit der Jahreszeit.

Typisch ist ein Minimum im Herbst beider Hemisphären und ein Maximum am Ende des Winters, das in der Antarktis im dortigen Frühling durch einen sehr starken Einbruch, das „Ozonloch", mit Werten bis unter 150 DU abgelöst wird. Auch in der Nordhemisphäre kann es in mittleren und hohen Breiten im Frühling tageweise zu Perioden mit dünner Ozonschicht („Ozon-Miniholes") kommen, die dann einen starken Anstieg der UV-Strahlung bewirken. Durch die atmosphärische Zirkulation können auch immer wieder Luftmassen mit wenig Ozon aus den Tropen in mittlere Breiten transportiert werden (so genannte Streamer), die für wenige Tage und eine begrenzte Region zu einer Erhöhung der UV-Strahlung führen. Um die Bevölkerung vor derartigen Bedingungen zu warnen, wird vom DWD eine globale (Modell GME) und eine regionale UVI-Vorhersage (Modell COSMO-EU, früher LME) betrieben (siehe Artikel Medizin-Meteorologisches Informationsangebot, Kapitel 6 in diesem Heft).

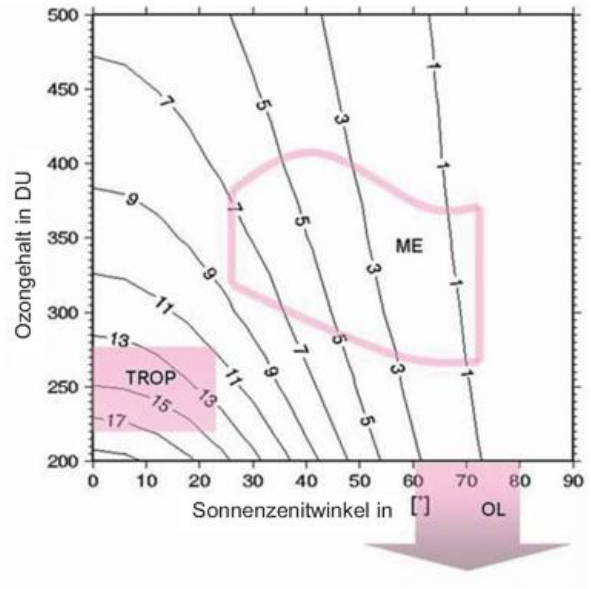


Abb. 2-5: UVI in Abhängigkeit von Ozongehalt in DU und Sonnenzenitwinkel, für wolkenlosen Himmel, mittlere Trübung, Meereshöhe, Vegetation. ME Mitteleuropa, TROP Tropen, OL Antarktisches Ozonloch.

Abb. 2-5 zeigt die Variation des UVI in Abhängigkeit von der Ozonschichtdicke und vom Sonnenzenitwinkel für wolkenlose mittlere Bedingungen in Meereshöhe. Die höchsten UVI, die Werte größer 15 erreichen können, ergeben sich natürlich für Bedingungen mit wenig Ozon und sehr steiler Sonne, wie sie in den Tropen vorkommen (in Abb. 2-5 markiert als Bereich TROP). Der Bereich ME steht für Bedingungen in Mitteleuropa, mit Sonnenzenitwinkeln zwischen 26° im Sommer und 73° im Winter, unter Berücksichtigung der mittleren Ozonvariation. Hier werden im Sommer UVI-Werte von 8 erreicht. Die Bedingungen im antarktischen Ozonloch (markiert als OL) sind gekennzeichnet durch geringe Ozonschichtdicke, aber – da das Ozonloch im frühen Frühling auftritt – auch durch große Sonnenzenitwinkel. Damit sind die Werte des UVI generell klein, können aber, wenn Reste des Ozonlochs bis Ende November bestehen bleiben und sich in Regionen bis 60° Breite verlagern, wegen der dann wieder geringeren Sonnenzenitwinkel Werte von mehr als 6 erreichen.

2.2.3 Einfluss von Aerosolpartikeln

Aerosolpartikel reduzieren die UV-Strahlung stark variabel, da hier nicht nur die bei kurzen Wellenlängen relativ hohe optische Dicke eingeht, sondern der Effekt von Streuung und Absorption getrennt betrachtet werden muss. Eine Verdoppelung der optischen Dicke bei konstantem Russanteil in urbanem Aerosol führt in erster Näherung ebenso zu einer Verdopplung der Schwächung der UV-Strahlung wie die Erhöhung des Russanteils von 0 auf 7 % bei fester optischer Dicke. Der UV-Effekt wird also auch durch den Aerosoltyp bestimmt. Im Mittel kann die aerosolbedingte UV-Reduktion mit 10 bis 20 % angesetzt werden, aber bei starker Luftverschmutzung auch Werte von 50 % erreichen.

2.2.4 Einfluss der Bodenalbedo

Die Bodenalbedo beeinflusst die UV-Globalstrahlung, da reflektierte Photonen in der Atmosphäre durch Luftmoleküle und Aerosolpartikel erneut nach unten gestreut werden können. Für wolkenlose Atmosphären führt eine Erhöhung der Albedo um 10 % im Mittel zu einer Erhöhung des UVI um 4 %. Generell ist die Albedo von Landoberflächen im Spektralbereich des UVI kleiner als 5 % und auch für den Ozean liegen die Werte nicht über 8 %. Einzig Schnee hat eine hohe Albedo im UV, die bei frischem Neuschnee 95 % erreichen kann und damit die Werte für das sichtbare Licht übersteigt. Da die Globalstrahlung durch die Albedo aus einer Region von mehr als 10 km Durchmesser beeinflusst wird, müssen im Allgemeinen gemischte Bodenverhältnisse berücksichtigt werden, d.h. bei einer teilweise schneebedeckten Landschaft mit einer vom Schneezustand abhängigen Albedo, die im Bereich zwischen 30 und 60 % liegt.

2.2.5 Einfluss von Wolken

Wolken reduzieren die UV-Strahlung am Erdboden, sobald sie Schatten werfen. Im schat-tenfreien Fall bei durchbrochener Bewölkung kann die Strahlung jedoch auch erhöht werden, nämlich dann wenn sowohl direkte Sonne als auch an Wolken reflektierte Strahlung den Empfänger treffen. Die Veränderung der Strahlung durch Wolken, gegenüber der Strahlung in der gleichen Atmosphäre, aber ohne Wolken, wird durch einen so genannten **C**loud **M**odification **F**actor (CMF) beschrieben (SCHWANDER et al. 2002). Der CMF kann somit Werte größer als 1 erreichen, aber gemittelt über etwas längere Zeiträume führen Wolken ganz überwiegend zu einer Reduktion der Strahlung, d.h. CMF < 1. Mit zunehmendem Bedeckungsgrad sinkt der CMF. Bei vollständiger Bedeckung erreicht er minimale Werte, die für hohe Wolken (Zirren) um 0,9 liegen, ein Wert der in den letzten Jahren in Süddeutschland etwas kleiner geworden ist. Altostratus, Nimbostratus und Stratus, mit einer optischen Dicke von rund 20, reduzieren die UV-Strahlung bei vollständiger Bedeckung auf etwa die Hälfte, während Cumolonimben den UVI auf 10 % seines Wertes für die klare Atmosphäre schwächen können.

Die Schwächung der UV-Strahlung durch Wolken ist geringer als die im sichtbaren Spektralbereich, hervorgerufen durch die mit abnehmender Wellenlänge zunehmende Rückstreuung der Luftmoleküle oberhalb der Wolken und dem relativ geringen Anteil der direkten Sonnenstrahlung im UV schon im wolken-

freien Fall. Durch Mehrfachreflexion zwischen Boden und Wolkenunterseite wird die Globalstrahlung unter einer Wolke erhöht, wenn bei sonst gleichen Bedingungen die Bodenalbedo erhöht wird. Zum Beispiel ist bei geschlossener Bewölkung mit optischer Dicke 20 der UVI zwar gegenüber dem wolkenfreien Fall reduziert, aber bei Neuschnee doppelt so hoch wie ohne Schnee. Diese Erhöhung ist Ursache der manchmal unterschätzten Sonnenbrandgefahr unter total bedecktem Himmel bei Schnee.

2.2.6 Einfluss der Höhe über NN

Die UV-Strahlung steigt mit zunehmender Stationshöhe, angegeben als Höheneffekt in %/km. Generell ist dies der Fall weil mit zunehmender Höhe immer die Dicke der schützenden Luft- und Ozonschicht reduziert wird. Dieser Hintergrundeffekt beträgt rund 7 %/km (PFEIFER et al. 2006). Mit der Höhenänderung wird aber häufig auch die über dem Empfänger liegende Aerosolschicht verlassen und die Bodenalbedo ändert sich, z.B. von Wiese oder Stein zu Schnee. Beides führt zu zusätzlicher Erhöhung der UV-Strahlung und damit zu weit höheren Werten des Höheneffekts (bis zu 25 %/km), die aber nicht allgemein gelten, sondern von den lokalen Bedingungen abhängen. Für den Fall, dass zwischen der niedrigeren und der höheren Position Wolken liegen, kann der Effekt natürlich noch viel höher sein, da die Wolken den UVI unterhalb stark reduzieren, während sie ihn oberhalb durch erhöhte Albedo sogar erhöhen. Zum Beispiel wurde als Mittelwert im April auf der Zugspitze (rund 3 km) eine um 75 % höhere UV-Strahlung gemessen als in Garmisch (0,7 km). Diese Erhöhung sollte jedoch nicht in %/km angegeben werden, da sie nur indirekt von der Höhendifferenz abhängig ist.

2.3 Zeitliche und räumliche Verteilung der UV-Strahlung

2.3.1 Zeitliche Änderung

Bei der zeitlichen und räumlichen Verteilung der UV-Strahlung wirken natürlich alle genannten Parameter zusammen, wobei die Sonnenhöhe dominiert. Hierdurch wird die mittlere tages- und jahreszeitliche Variation der UV-Globalstrahlung bestimmt. Durch die starke Absorption im UV-Bereich ist hier die sonnenstandsbedingte Variation der Globalstrahlung deutlich stärker als im sichtbaren Bereich, mit dem Ergebnis, dass im Mitteleuropa der UVI bei wolkenlosen Bedingungen und Sonnenhöchststand im Sommer rund 10 mal so groß ist wie im Winter, während diese Änderung für die solare Globalstrahlung nur einen Wert von rund 4 hat. Bei aktuellen Tages- und Jahresgängen spielen natürlich auch die jeweiligen Atmosphärenparameter eine wesentliche Rolle. Deutlich ist immer der Einfluss von Wolken, und im Jahresgang auch der von Ozon und gegebenenfalls der des Aerosols und von der Albedo. Aufgrund der phasenverschobenen Jahresgänge von Sonnenstand und Ozonschichtdicke verzögert sich in Breiten zwischen etwa 30 und 60° unter wolkenlosen Bedingungen das Jahresmaximum des UVI um etwa zwei Wochen gegenüber dem Sonnenhöchststand.

2.3.2 Globale Verteilung

In der globalen Verteilung des UVI bei Sonnenhöchststand zeigt sich neben der breitenabhängigen Sonnenhöhe auch die unterschiedliche Dicke der Ozonschicht und die Variation der anderen Atmosphärenparameter. Als Beispiele werden maximale UVI in Abb. 2-6 (a) für wolkenlosen Himmel für den Nordwinter und in Abb. 2-6 (b) für bewölkten Himmel für den Nordsommer gezeigt. In beiden Fällen sind die Werte berechnet auf der Basis von jeweils über 8 Jahre gemittelte Atmosphärenbedingungen, für einen Zehntageszeitraum. Die UV-Situationen unterscheiden sich aus astronomischen und geophysikalischen Gründen. Deutlich erkennbar ist die Verschiebung des Maximus mit dem Sonnenhöchststand von 20° S im Winter (Abb. 2-6 (a)) zu 20° N im Sommer und die Strukturierung der UVI-Verteilung durch die Bewölkung (Abb. 2-6 (b)). Weiter gilt, dass die Bestrahlungsstärke an der Obergrenze der Atmosphäre zwischen sonnennächstem, Anfang Januar, und sonnenfernstem Punkt, Anfang Juli, um gut 6 % differiert. Die Nordhemisphäre hat in den außertropischen Bereichen im Durchschnitt höhere Ozonschichtdicken, da in der Stratosphäre oberhalb von etwa 20 km im Winter und Frühjahr in der Nordhemisphäre der meridionalen Transport von Ozon (Brewer-Dobson-Zirkulation) aus den tropischen Quellgebieten zum Akkumulationsbereich äquatorwärts des Polarwirbels verstärkt ist. Die Unterschiede flachen zum herbstlichen Minimum der Ozonschichtdicke wieder ab, sind im Sommer jedoch noch signifikant. Die natürliche, z. B. aus Wüsten, und die anthropogen bedingte Trübung der Atmosphäre ist in der Nordhemisphäre auch über den Ozeanen etwas höher und schwächt die den Erdboden erreichende UV-Strahlung zusätzlich ab.

Unter Beachtung nur dieser genannten Effekte, das heißt ohne Bewölkung, ist die Verteilung des UVI noch weitgehend breitenkreisparallel. Sie wird aber durch Gebirge (z. B. Rocky Mountains, Anden, Himalaya), Schnee- und Eisbedeckung der Landmassen (Antarktis, Grönland) sowie von Meereis (Arktis, Schelfeis der Antarktis) regional gegliedert. Die räumliche Verteilung der Effekte von Schnee und Eis variiert ausgeprägt im Jahreszeitenrhythmus, besonders in der Nordhemisphäre mit einer weiten Südausdehnung in Nordamerika, Asien und auch Teilen Europas im Winter bis ins beginnende Frühjahr. Die gegenüber Meereis höhere Albedo von Schnee und die Meereshöhe wirken sich für wolkenfreie Bedingungen unter anderem im erhöhten UVI der Antarktis gegenüber der Arktis aus.

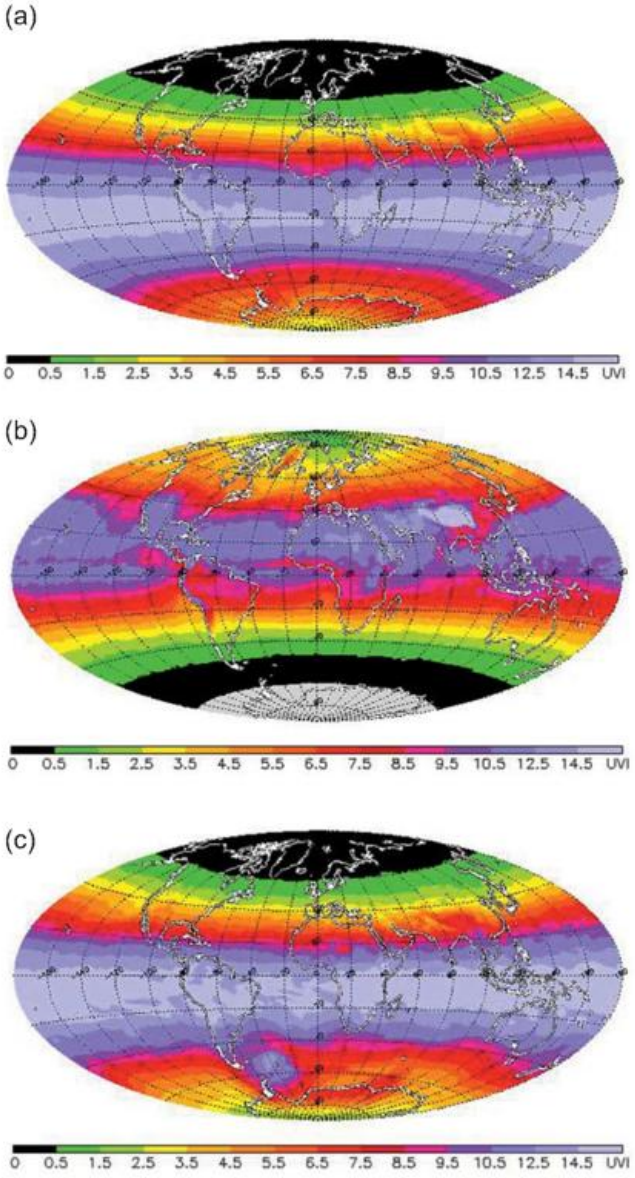


Abb. 2-6: Globale Verteilung des UV-Index (a) UV-Index wolkenlos, Mittel 1. Dekade Januar 1986–93 (Basis: TOMS-V8 Ozon). (b) UV-Index bewölkt, Mittel 1. Dekade Juli 1986–93 (Basis: TOMS-V8 Erythemwirksames UV). (c) UV-Index wolkenlos, 08. November 2005 (Quelle: DWD-PROMOTE).

Unter wolkenlosem Himmel wird die Genauigkeit der Modellierung der globalen Verteilung des UVI überwiegend durch die nur ungenaue Kenntnis der hoch variablen Aerosoleigenschaften begrenzt, die eine stärkere Rolle in der UV-Verminderung als bisher angenommen spielen. Eine tägliche satellitengestützte global deckende Kartierung der aerosoloptischen Dicke ist durch die Instrumente der NASA und der ESA möglich, wenn auch über den Wüsten nur eingeschränkt. Die für die Schätzung der Reduktion der UV-Strahlung notwendige Detektierung des absorbierenden Anteils des Aerosols (DE GRAAF et al. 2005) zeigt im Vergleich mit bodengestützten Messungen noch Inkonsistenzen. Die Karten der Abb. 2-6 stützen sich deshalb auf die Verteilung der Single Scattering Albedo des „Globalen Aerosol Datensatzes“ (KOEPKE et al. 1997). Die im kurzwelligen UV stark absorbierenden Wüstenaerosole vermindern den UV-Index verglichen mit unbelasteten Bereichen gleicher Breite besonders über der Sahara um 20 bis 30 %, an Einzeltagen bis über 50 %, aber auch über der arabischen Halbinsel, dem mittleren Osten und den Wüsten Westchinas. Darin begründet ist die bekannte Erfahrung, dass die Sonnenbrandgefahr am Toten Meer und im Senegal gemindert ist. Die Staubproduktion ist von Juni bis September am größten, zwischen November und April dagegen deutlich reduziert. Stärker absorbierender Rauch aus der großräumigen Verbrennung von Biomasse reduziert den UVI in den Trockenzeiten der Südhemisphäre über dem westlichen Afrika und in Südamerika über Paraguay und dem südwestlichen Brasilien. Erhöhte Niederschlagsmengen in Einzeljahren lassen in Südamerika die Zahl von Feuern abnehmen, in Afrika nehmen sie durch verstärktes Pflanzenwachstum zu.

Die größte Variabilität des bodennahen UVI innerhalb einer Klimazone wird durch Bewölkung induziert (Abb. 2-6 (b)). Die generelle geografische Verteilung des UVI im Jahresgang ist dabei von Jahr zu Jahr gleich, mit besonders geringen Schwankungen in den Regionen mit hoher UV-Strahlung. Starke Reduktionen des UVI durch Wolken finden sich über den Regenwäldern von Kongo und Amazonas, in der Innertropischen Konvergenzzone auch über den Ozeanen, saisonal in den Monsungebieten Vorderindiens, Teilen Hinterindiens und Chinas. Die häufigen Nebel und Stratusfelder an der Inversion über dem kalten Auftriebswasser vom Humboldtstrom an der Westküste Südamerikas und Benguelastrom an der Küste Namibias reduzieren den UVI bevorzugt im Südfrühjahr. Zonal gemittelte minimale CMF stimmen gut mit Bewölkungsklimatologien überein. Sie hängen von der geographischen Breite ab, mit Werten zwischen 0,4 und 0,6 bei 60° und nur noch 0,9 in den Subtropen. Im äquatorialen Bereich sind die Ozeane mit Werten ähnlich den Subtropen und Landmassen mit einem Minimum des CMF von 0,7 zu unterscheiden, dessen Lage jahreszeitlich variiert. Der Einfluss von Wolken im Verhältnis zu Ozon für interdiurne Änderungen des UVI wurde für das tropische Australien auf 8 zu 1 abgeschätzt, während für mittlere Monatsdosen in den Niederlanden sich ein Verhältnis von 3 zu 1 ergibt (DEN OUTER et al. 2005).

Zusammenfassend ist mit den höchsten Expositionen durch erythemwirksame UV-Strahlung im Nordsommer in Tibet und im Südsommer in den tropischen und subtropischen Teilen Australiens und in Südafrika zu rechnen. Dies ergibt sich wegen der Sonne, die nahezu den Zenit erreicht, und weil es sich um häufig wolkenfreie Regionen handelt. Die Höhe über dem Meeresspiegel ist zusätzlich von Bedeutung. In diesem Zusammenhang soll betont werden, dass diese hohen Expositionen in der Südhemisphäre nicht mit dem Antarktische Ozonloch in Verbindung stehen.

2.3.3 UVI im Antarktischen Ozonloch

Die oben bereits diskutierte Erhöhung des UVI im Antarktischen Ozonloch wird in Abb. 2-6 (c) als Beispiel gezeigt, unter der Annahme wolkenfreier Bedingungen. Unter den realen Bedingungen, mit Bewölkung (keine Abbildung), ist die Ozonloch bedingte UVI-Erhöhung stark maskiert.

Die relative UV-Zunahme in der Antarktis durch das Ozonloch im September ist groß, aber abhängig von seinem Umfang und seiner Tiefe und damit von Jahr zu Jahr variabel. In absoluten Werten ist die Zunahme jedoch klein, wegen der in diesem Monat andauernd geringen Sonnenhöhe und damit geringem UVI. Die eigentlichen jährlichen Maxima des UVI in der Antarktis werden im November und frühen Dezember beobachtet, ein bis zwei Monate nach der Periode größter Ozonverdünnung. Die Erklärung ist die nun vergleichsweise hoch stehende Sonne verbunden mit der noch bis in den November anhaltenden verminderten Ozonkonzentration in der Stratosphäre. Daraus ist zu folgern, dass Änderungen in der Andauer und Ausdehnung des Ozonlochs größeren Einfluss auf biologisch relevante UV-Bestrahlungsstärken haben als die größte Tiefe des Ozonlochs, die typischerweise Ende September bis Anfang Oktober beobachtet wird (WMO 2003). Ein UVI von 7,5 wurde als Extrem unter wolkenfreien Himmel und Einfluss des Ozonlochs in Mc Murdo, 77,5° S, gemessen. Zwischen September und November ist hier die Variabilität im UV, die von Änderungen der Ozonschicht ausgelöst wird, doppelt so hoch wie die bedingt durch Wolken.

Die Verteilung des UVI für wolkenfreien Himmel, gemittelt für die jeweils dritte Dekade über die Zeiträume 1978 bis 1985 und 1986 bis 1993 spiegelt die Auswirkung der Ozonveränderung, speziell die Vertiefung des antarktischen Ozonlochs, auf den UVI wieder (keine Abbildungen). Im atlantischen Sektor nimmt durch die Ozonabnahme die Höhe des UVI und auch die Ausdehnung des Bereichs erhöhter Werte in Breiten südlich etwa 58° S deutlich zu, in der Nordhemisphäre gibt es dagegen praktisch keine Verschiebung des UVI nach Norden, da sich das Ozon im Nordherbst kaum verändert hat. Umgekehrt ist die Situation im Nordfrühling.

2.3.4 UVI in der Vergangenheit und in der Zukunft

Für die Vergangenheit, für Orte an denen nicht gemessen wird, und für die Zukunft kann die UV-Strahlung nur durch numerische Simulation aus der verfügbaren Information über die relevanten Atmosphärenparameter bestimmt werden. Dies geschieht üblicherweise durch Modellierung der UV-Strahlung für den wolkenfreien Fall und Berücksichtigung des Wolkeneinflusses über einen CMF oder durch Berücksichtigung der Sonnenscheindauer. Für die Vergangenheit kann der CMF, je nach verfügbarer Information, durch Korrelation mit dem Bedeckungsgrad bestimmt werden oder durch Verwendung der Globalstrahlung im solaren Spektralbereich. Im ersteren Fall sind häufiger Daten verfügbar, aber es bleibt die Unsicherheit der optischen Dicke der Wolken und ihrer Position relativ zur Sonne. Bei bekannter Globalstrahlung jedoch kann der daraus ermittelte Wolkeneinfluss (CMFsol) auf den Wolkeneinfluss im UV-Bereich (CMFuv) übertragen werden. Dieses Verfahren berücksichtigt neben den Effekten von Dicke und Position der Wolken zusätzlich automatisch auch die von Aerosolpartikeln. Die Korrelation von CMFsol mit CMFuv ist sonnenstandsabhängig und natürlich abhängig von klimatologischbedingten Wolkeneigenschaften. Insofern führt die Verwendung von direkt vor Ort bestimmtem Zusammenhang zu besonders guten UVI-Werten (TREPTE und WINKLER 2004), aber auch die Übertragung auf andere Regionen innerhalb Europas ist mit nur geringen Unsicherheiten möglich.

Abb. 2-7 zeigt die langfristige Änderung der über die Sommermonate gemittelten UV-Tagesdosis für den Hohenpeißenberg. Da es sich nur um Sommerwerte handelt, spielt die Albedo keine Rolle. Der Anstieg gegenüber 1970 resultiert aus der Ozonabnahme, mit Spitzen in den Jahren 1983 und 1992 durch Ozonminima nach Vulkanausbrüchen. Die hohen Werte 1976 beruhen dagegen auf wolkenarmen Bedingungen und die niedrigen um 1980 auf starker Bewölkung. Analoge Ergebnisse für ganze Jahre zwischen 1926 und 2003 für Davos (LINDFORS und VUILLEUMIER 2005) zeigen eine relativ geringe Variation durch die Schneealbedo, aber bis 1970 starke Schwankungen auf Grund der Bewölkung und geringere durch Änderungen im Ozon. Um 1980 zeigt sich auch für Davos ein bewölkungsbedingtes UV-Minimum wie am Hohenpeißenberg und die Wolkeneffekte werden ab 1970 überlagert durch einen deutlichen UV-Anstieg auf Grund der Ozonabnahme.

Für die Modellierung der UV-Strahlung in der Zukunft müssen auch die Ozon- und Wolkendaten mittels Mo-

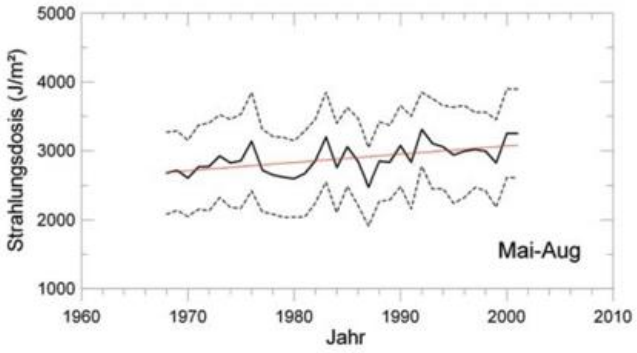


Abb. 2-7: Entwicklung der UV-Tagesdosis am Hohenpeißenberg, modelliert unter Verwendung von solarer Globalstrahlung und anderen Atmosphärendaten (TREPTE und WINKLER 2004).

dellen bestimmt werden. Für die Vorhersage in den nächsten Tagen stehen diese Daten mit guter Qualität zur Verfügung und können deshalb sowohl für globale Karten (STAIGER und KOEPKE 2005) als auch für UV-Warnungen verwendet werden (siehe Artikel: Medizin-Meteorologisches Informationsangebot, Kapitel 4). Für die fernere Zukunft beruhen die Ozon-Daten nicht nur auf der Qualität der Chemie- und Transportmodelle, sondern auch auf den angenommenen Szenarien für die zukünftige Emission der ozonschädigenden Gase. Ausgehend von modellierten Ozondaten wurde für 2050 für wolkenlose Bedingungen ein Rückgang der UV-Strahlung auf Werte der 70er Jahre des vergangenen Jahrhunderts vor der Ozonzerstörung ermittelt. Regionale Klimamodelle ergeben für Mitteleuropa bis zur Mitte des Jahrhunderts im Winter eine Zunahme der Bewölkung und in den Sommermonaten einen Rückgang. Dies würde dazu führen, dass in den Wintermonaten der UV-Strahlungsrückgang durch Bewölkungszunahme verstärkt wird, während im Sommer bei der mittleren Tagesdosis der Effekt der Ozonerholung überkompensiert und die Wolkenabnahme zu einer Erhöhung der UV-Tagesdosis von 5 bis 10 % führen würde. Diese Erhöhung würde verstärkt für die UV-A-Strahlungsdosis gelten, da diese ja durch eine Erholung der Ozonschicht nicht zurückgehen, aber durch die Bewölkungsabnahme ebenso wie die im UV-B zunehmen würde. Insofern sollte der Rolle der UV-A-Strahlung in Zukunft größere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

3 UV-Strahlung: Wirkung auf den Menschen

Langjährige UV-Bestrahlung führt zu frühzeitiger Hautalterung (Photoalterung), die als harmlose kosmetische Beeinträchtigung angesehen werden kann. Aber die UV-Strahlung ist auch der hauptsächliche auslösende Faktor für die Entwicklung von Hauttumoren, die wesentlich schwerwiegendere Folgen für die menschliche Gesundheit haben. Besonders häufig sind die örtlich zerstörend wachsenden Basalzellkarzinome und die spinozellulären Karzinome, die über die örtliche Tumorentwicklung hinaus metastasieren können. Der gefährlichste Hauttumor ist das maligne Melanom, das wegen seiner raschen Metastasierung häufig zum Tod führt. Ein zusätzlich schädigender Effekt der UV-Strahlung ist die Immunsuppression, eine Verringerung der Körperabwehr z. B. gegenüber Infektionskrankheiten.

Ein positiver Effekt der UV-Strahlung ist die Synthese von Vitamin D in der Haut. Dieses Vitamin ist im Körper für den Calcium- und Phosphatstoffwechsel und damit für den Zahn- und Knochenaufbau essentiell. Die notwendige Vitamin D-Dosis wird in Deutschland im Sommer bei wolkenlosen Bedingungen gegen Mittag durch eine Exposition von Händen, Armen und Gesicht für etwa 15 Minuten, zwei bis dreimal wöchentlich erreicht. Im Winter und in höheren Breiten ist die UV-Bestrahlung aber deutlich geringer, so dass sie zur ausreichenden Vitamin D-Synthese nicht genügt. Da in der Nahrung Vitamin D nur in geringem Maß vorhanden ist, im Wesentlichen in fettem Fisch und Eigelb, und eine künstliche Anreicherung von Nahrungsmitteln mit Vitamin D in Deutschland nicht vorgenommen wird, kann es deshalb zu einem Mangel an Vitamin D kommen. Über einen solchen Mangel wurde auch bei Personen mit *Xeroderma pigmentosum* berichtet. Diese müssen das Sonnenlicht absolut meiden, da ihre Haut über keinerlei Reparaturmechanismen verfügt. Ein weiterer positiver Effekt der UV-Strahlung ist der erfolgreiche therapeutische Einsatz bei schwerwiegenden chronischen Hauterkrankungen wie z. B. Psoriasis (Schuppenflechte), bei denen andere Therapiemaßnahmen nicht zu ausreichenden Behandlungserfolgen führen.

3.1 Dosis, Hauttyp und Minimale Erythem Dosis

Die für den Menschen relevante solare UV-Strahlung wird üblicherweise als erythem-gewichtete Strahlungsflussdichte Eery in W/m² angegeben oder als UVI (siehe Kapitel 2.1). Für die Wirkung der Strahlung ist jedoch die in der Haut kumulierte Strahlungsenergie verantwortlich. Pro Flächeneinheit heißt diese Größe Bestrahlung oder, im photobiologischen Bereich, Dosis

$$H_{ery} = \int E_{ery}(t) \cdot dt \qquad (2)$$

(H, Einheit J/m²) :
Die Wirkung der UV-Strahlung kann bei gleicher Dosis bei verschiedenen Menschen unterschiedlich sein, da diese unterschiedlich auf die Strahlung reagieren, zu unterschiedlichen Hauttypen gehören. Nach DIN (2000) ist der Hauttyp gekennzeichnet durch die **m**inimale **e**rythemwirksame **D**osis (MED), d.h. die Dosis erythemgewichteter Strahlung, die bei gänzlich sonnenungewohnter Haut als erstes zu einer scharf begrenzten Hautrötung, eben einem Erythem, führt (Abb. 2-8). Die in der DIN unterschiedenen vier Hauttypen sind in

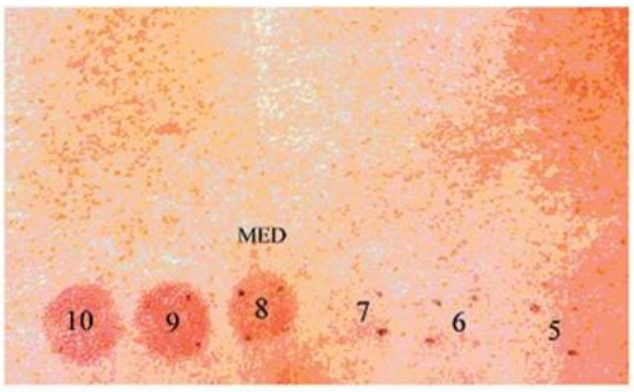


Abb. 2-8: Zur Ermittlung der Minimalen Erythem Dosis wird die Haut mit steigender Dosis bestrahlt, um so die für die Hautrötung notwendige Dosis, die MED, zu ermitteln.

Haut-typ	Häufigkeit in Deutsch-land	Hautreaktion und ethnische Zuordnung	Richtwerte MED J/m²
I	2 %	immer schnell Sonnen-brand, kaum oder keine Bräunung auch nach wie-derholten Bestrahlungen (keltischer Typ)	200
II	12 %	fast immer Sonnenbrand, mäßige Bräunung nach wiederholten Bestrahlun-gen (hellhäutiger europäi-scher Typ)	250
III	78 %	mäßig oft Sonnenbrand, fortschreitende Bräunung nach wiederholten Be-strahlungen (dunkelhäu-tiger europäischer Typ)	350
IV	8 %	selten Sonnenbrand, schnell einsetzende Bräu-nung (mittelmeerischer Typ)	450

Tab. 2-2: Einteilung von Hauttypen nach der Reaktion von nicht vorbestrahlter Haut auf natürliche Sonnenbestrahlung (nach DIN 2000) und ihre Häufigkeit.

Tab. 2-2 angegeben, zusätzlich mit einer ethnischen Zuordnung. Im individuellen Fall können sich allerdings erhebliche Abweichungen zwischen dem über diese Zuordnung definierten Hauttyp und seiner Reaktion auf UV-Strahlung zeigen.

Sowohl der UVI als auch die erythemwirksame Dosis H_{ery} sind physikalische Größen, die nicht vom Hauttyp abhängig sind und damit geeignet, um die Strahlungsverhältnisse abolut zu beschreiben.

Einigen Medien ist die Angabe eines UVI jedoch zu unanschaulich. Sie bevorzugen die Angabe von Sonnenbrandzeiten t_{sb}, d. h. der Zeit in welcher eine MED (angegeben in J/m²) erreicht wird. Diese errechnet sich nach

$$t_{sb} = \frac{MED \cdot 40}{UVI} \text{ sec } = \frac{2}{3} \cdot \frac{MED}{UVI} \text{ min} \qquad (3)$$

Diese Größe stellt nicht mehr ein reines Maß für die Einstrahlung dar, sondern ist hauttypabhängig. Wenn nicht zwischen Hauttypen differenziert wird, wird die Zeit bis zum Sonnenbrand üblicherweise auf Hauttyp II bezogen, als relativ große Gruppe mit hoher UV-Empfindlichkeit. Für diesen Hauttyp II ergibt sich

$$t_{sb} = \frac{167}{UVI} \text{ min} \qquad (4)$$

was bedeutet, dass zum Beispiel bei UVI = 6 bereits weniger als eine halbe Stunde Bestrahlung genügen können, um bei sonnenungewohnter Haut zu einer Rötung zu führen. Da die den Zeiten zugrunde liegenden Werte für die MEDs sich auf minimale Rötung von vollständig sonnenungewohnter Haut bei senkrechter Einstrahlung beziehen, können sich in der Praxis andere Zeiten ergeben, z. B. wegen individuellen Hauteigenschaften, wegen Gewöhnung an die Sonne, und auch wegen der Orientierung der Hautpartien zur Sonnenrichtung während der Bestrahlung.

Auf Grund der individuellen MED gilt, dass die tolerierbare Bestrahlungszeit bei gegebenem UVI für verschiedene Menschen unterschiedlich ist. Um diesen individuellen Hautreaktionen Rechnung zu tragen wird von der WHO (2002) angestrebt, dass nur der UVI als relevante Größe zur Beschreibung der UV-Intensität verwendet wird und jeder Mensch sein Verhalten seiner UV-Empfindlichkeit anpasst. Für die Information der Öffentlichkeit soll deshalb auf die Nennung einer Sonnenbrandzeit verzichtet werden und ausschließlich der UVI verwendet werden. Dies hat auch das Ziel, die Expositionszeiten insgesamt zu begrenzen und nicht dazu zu verleiten, sich bis zur Erythemgrenze zu exponieren, da auch bei geringerer Dosis schon DNA-Schäden gefunden wurden.

3.2 Exposition des Menschen

Für die Wirkung der UV-Strahlung ist die Exposition, die Strahlungs-Dosis, verantwortlich, das heißt hier geht sowohl die Intensität der Strahlung ein, als auch deren Dauer. Damit kann, um die UV-Bestrahlung auf ein verträgliches Maß zu senken, jede der beiden Größen reduziert werden: Dies führt zu der üblichen Verhaltensweise, entweder die Einstrahlung durch Schutzmassnahmen (Schatten, Kleidung, Sonnenschutzmittel) zu reduzieren oder die Aufenthaltszeit in der Sonne zu kürzen. Die Bestrahlung von menschlicher Haut hängt nicht nur vom UVI ab, der üblicherweise auf einen horizontalen Empfänger bezogen ist, sondern auch von der Orientierung der Haut. Große Bereiche der menschlichen Haut sind nicht horizontal orientiert, sondern sind geneigt (Stirne, Nase, Schultern), senkrecht (Wangen, Hals, Rumpf) oder sogar nach unten (Kinn) gerichtet. Die auf eine derartige, geneigte, Fläche fallende Strahlungsflussdichte hat andere Werte und auch eine andere spektrale Zusammensetzung als die auf einen horizontalen Empfänger. Der Grund liegt darin, dass bei der Integration der Strahldichten über den Halbraum zur Strahlungsflussdichte diese mit dem Kosinus des Zenitwinkels gewichtet werden.

Diese Kosinuswichtung bezieht sich bei jeder Fläche jeweils auf den Winkel zur Flächen-normalen, so dass die einfallenden Strahldichten bei einem geneigten Empfänger anders gewichtet werden als bei dem horizontalen. Zusätzlich wird auf den geneigten Empfänger Strahlung direkt von der Erdoberfläche reflektiert und es gibt die Bereiche mit Körperschatten, in denen die Bestrahlung nur aus diffuser Strahlung besteht.

In Richtung zur Sonne kann die Strahlungsflussdichte auf einen geneigten Empfänger deutlich höher werden als die auf einen horizontalen Empfänger.

Abb. 2-9 zeigt das Verhältnis der maximalen Strahlung auf eine geneigte Fläche zu der auf eine horizontale Fläche, bezeichnet als **T**ilt **M**odification **F**actor (TMF), für verschiedene Bodenoberflächen in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel. Bei senkrechter Sonne ist der TMF natürlich 1 und bei ganz flacher Sonne geht er auch wieder auf 1 zurück, da dann die direkte Sonne zur Strahlungsflussdichte keinen Beitrag mehr leistet und die Hauptstrahlung aus dem Zenitbereich kommt. Für Schneebedingungen mit klarer Luft in einer Höhe von 3 km über NN (z. B. auf der Zugspitze) kann die Strahlung, z. B. auf das Gesicht, bis zu 60 % höher sein als der Wert auf einen horizontalen Empfänger, wie er in der UV-Vorhersage angegeben wird. Bei Situationen mit Horizontüberhöhung durch reflektierende Schneeflächen kann der Wert sogar noch höher werden. Für Bedingungen im Flachland ist die Erhöhung nicht so ausgeprägt, da der relative Beitrag der direkten Sonne und auch der vom Boden hier geringer ist.

Bei flach stehender Sonne wird die direkte Strahlung für einen horizontalen Empfänger reduziert, z. B. bei einer Sonnenhöhe von 20° auf 1/3, aber nicht für einen in Richtung Sonne geneigten Empfänger. Allerdings erhält der geneigte Empfänger mit zunehmender Neigung einen immer größer werdenden Anteil von am Boden reflektierter Strahlung an Stelle von Himmelsstrahlung. Da die Bodenalbedo im UV für die meisten Oberflächen gering ist, führt dies normalerweise zu einer Reduktion der Strahlungsflussdichte. Bei Schnee jedoch, im frischen Zustand mit einer Albedo im UV von mehr als 80 %, kann der Beitrag der Strahlung von unten größer sein als der der abgeschnittenen Himmelsstrahlung. Dies ist ein Fall der insbesondere in Skandinavien im Frühjahr hohe Bedeutung hat. Die

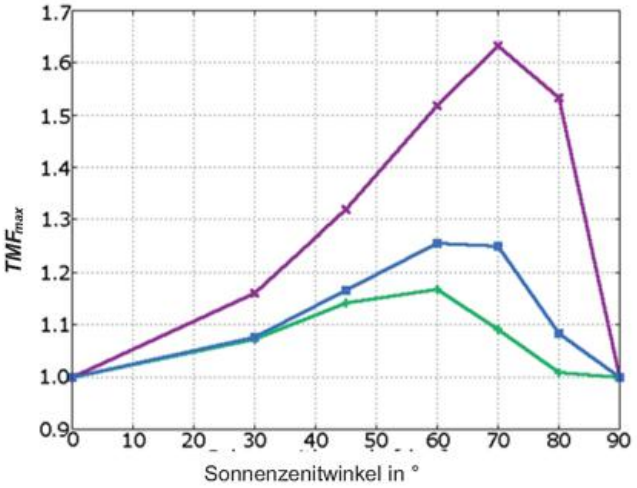


Abb. 2-9: Maximale Erhöhung der erythemgewichteten UV-Strahlungsflussdichte auf eine geneigte Fläche im Verhältnis zu der auf einen horizontalen Empfänger (KOEPKE und MECH 2005) in Abhängigkeit von dem Sonnenzenitwinkel für wolkenfreie Bedingungen. grün: Wiese, mittlere Trübung, Meereshöhe, blau: Strand, klare Atmosphäre, Meereshöhe, violett: Frischer Schnee, klare Atmosphäre, 3000 m über dem Meer.

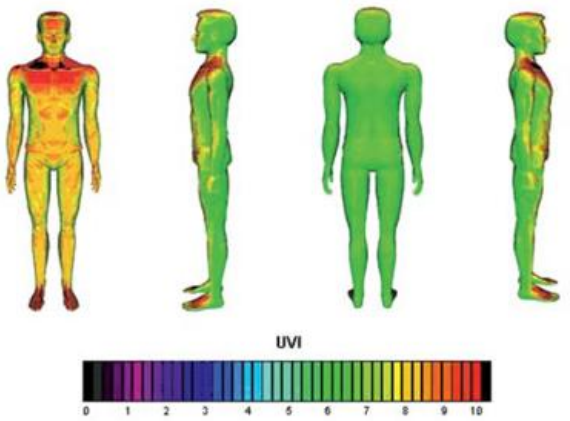


Abb. 2-10 Verteilung der UV-Strahlung, angegeben als UVI, auf den Körper eines nach Süden orientierten Mannes. Strahlungsbedingungen gemessen am Schneefernerhaus (2800 über NN) am 12.Juni 2001 (Sonnenzenitwinkel 24°) (Hoeppe et al., 2004).

Definition des UVI lässt es deshalb zu, ihn auch auf geneigte Flächen anzugeben, wenn dies speziell gekennzeichnet wird.

Experimentelle Untersuchungen der UV-Strahlung auf geneigte Flächen werden mit Kunstköpfen gemacht und auch mittels Dosimetern direkt am Körper, so dass in die Messwerte sowohl die Orientierung als auch der Aufenthaltsort des Probanden und die aktuelle Bestrahlung eingeht (KIMLIN et al. 1998). Durch systematische Messung mit einem Radiometer, das in kurzer Zeit in viele Richtungen geschwenkt wird (HOEPPE et al. 2004) wurde die UV-Bestrahlung auf verschieden orientierte Flächen für verschiedene meteorologische und geographische Bedingungen bestimmt. Die so ermittelten Ergebnisse können auf einen menschlichen Empfänger umgerechnet werden und damit besonders gefährdete Stellen des Körpers markieren (Abb. 2-10).

Bei dem zeitlichen Aspekt der Strahlungseinwirkung ist nicht nur die reine Dauer zu berücksichtigen, sondern auch der Zeitpunkt des Beginns der Bestrahlung, da hiervon die Änderung der Bestrahlungsstärke bestimmt wird. Die üblichen Berechnungen der Zeit, die man ungefährdet in der Sonne bleiben darf, gehen immer von einem festen UVI aus. Das ist gerechtfertigt für die Zeit bei Sonnenhöchststand und die relativ kurzen Zeiträume, wie sie für die sonnenungewohnte Haut berechnet werden. Wenn aber längere Zeiträume betrachtet werden, wie sie z. B. bei Gebrauch von Sonnenschutzmittel auftreten können, macht es einen grossen Unterschied ob mit der Bestrahlung am Vormittag oder am Nachmittag begonnen wird. Im ersten Fall, z. B. bei Beginn zwei Stunden vor Sonnenhöchststand, nimmt der UVI im Laufe der Bestrahlungszeit deutlich zu und damit wird die Dosis größer als sich bei konstanter Annahme des Startwertes ergäbe. Bei Beginn des Sonnenbades am Nachmittag, z. B. zwei Stunden nach Sonnenhöchststand, geht der UVI in der Folge jedoch stetig zurück, so dass die Dosis bei gleicher Dau-

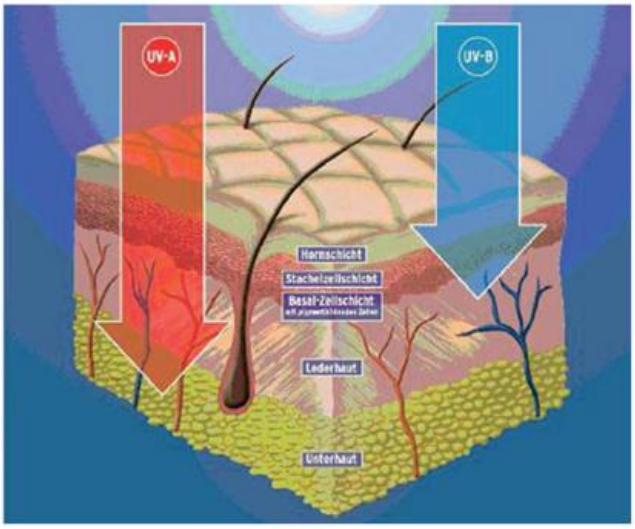


Abb. 2-11: Schnitt durch die menschliche Haut mit der Eindringtiefe von UV-Strahlung unterschiedlicher Spektralbereiche (nach BfS).

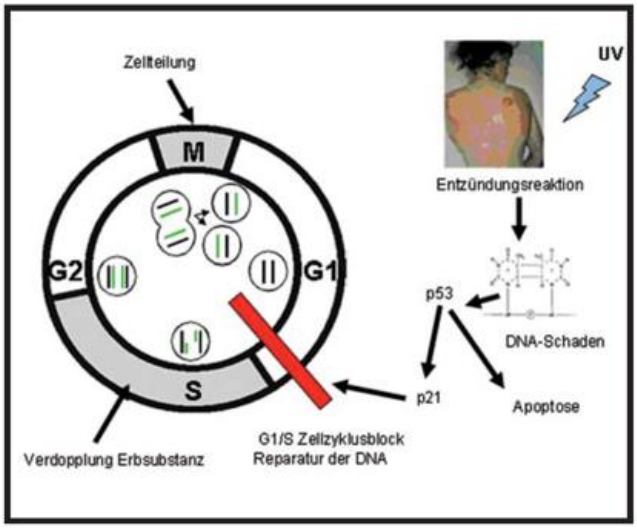


Abb. 2-12: Zellteilungszyklus mit möglichen Störungen durch UV-Strahlung und Reparaturmechanismen (siehe Text). p53: Nach DNA-Schädigung kann es zur Aktivierung von Onkogenen oder zur Heraufregulation oder Aktivierung von Tumor-Suppressor-Gen-Produkten wie p53 kommen. Nach UV-Schädigung der Zelle wird p53 überexprimiert, dadurch kommt es zu einer Zellzyklusblockade in der G1Phase, in der eine DNA-Reparatur möglich ist. p21: Das Protein p21 ist ein zyklinabhängiger Kinase-Inhibitor, der ebenfalls der Kontrolle des Zellzyklus dient. Eine Induktion der Transkription des p21 führt zu einem Stillstand des Zellzyklus, während deren Hemmnung zu verschiedenen vom Kontext abhängigen Effekten führt. G1 und G2 sind Blockaden im Zellzyklus

er viel geringer wird und eventuell für den Rest des Tages gar keine Sonnenbrandgefahr mehr besteht.

3.3 UV-Wirkung

3.3.1 Wirkung in der Zelle

Trifft UV-Strahlung auf die Haut, so wird eine Vielzahl von Wirkungen ausgelöst. UV-B wird bereits in der Epidermis (Oberhaut) und der oberen Dermis (Unterhaut) absorbiert. UV-A-Strahlung reicht dagegen bis ins dermale Bindegewebe (Abb. 2-11). Eine geringe Menge der in die Haut eindringenden Strahlung wird rückgestreut, der überwiegende Teil aber absorbiert. Ein Teil der absorbierten Energie wird in Wärme überführt, der größere Anteil dient zur Anregung von Molekülen. Die durch UV-A-Photonen angeregten Moleküle können zur Bildung von freien Radikalen (Atome oder Moleküle mit einem oder mehreren ungepaarten Elektronen) und zur Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS, elektrisch geladene Sauerstoffmoleküle) führen, welche einen indirekten (oxidativen) Zellschaden (z. B. Lipidperoxidation) und in geringem Maße auch DNA-Schäden induzieren können.

Durch die größere elektromagnetische Energie der Photonen der UV-B-Strahlung kann das Erbgut der Zelle (DNA, Desoxyribonukleinsäure) direkt geschädigt werden. Hierbei entstehen z. B. Cyclobutanpyrimidindimere, die durch eine Verknüpfung von zwei Pyrimidinbasen desselben DNA-Strangs gebildet werden. Diese Veränderungen können eine regelgerechte Verdopplung des Erbguts während der Zellteilung verhindern, wodurch die Funktionstüchtigkeit der Zelle eingeschränkt werden kann.

Diese Schäden können durch Reparatur behoben werden oder es kommt zum programmierten Zelltod (Apoptose). Da trotz beider Prozesse geschädigte Zellen übrig bleiben können, kann es zur Entstehung von entarteten (bösartigen, malignen) Zellen kommen und letztendlich zur Entwicklung von malignen Tumoren.

UV-bedingte, für die Photokarzinogenese bedeutsame Zelleffekte sind (Abb. 2-12):

- Entzündungsreaktion: Die Rötung nach UV-Bestrahlung wird wesentlich durch Prostaglandine vermittelt. Das Schrittmacherenzym der Prostaglandinsynthese ist die Zyklooxygenase, die als Folge der UV-Exposition der Zelle vermehrt gebildet wird. Durch Hemmung der Zyklooxygenase durch nichtsteroidale Antiphlogistika lässt sich eine Erythemreaktion verhindern. Der molekulare Mechanismus ist jedoch noch unklar.
- DNA-Schaden: Bei Tumoren kommt es aufgrund Schädigung der DNA zur Alteration des Zellzyklus und zu ungehemmtem Ablauf der Zellteilung, Zell-Proliferation (LODISH et al. 1995). Unkontrollierte Proliferation ist einer der grundlegenden Prozesse bei der Tumorentstehung, die bei UV-induzierten Tumoren ebenfalls eine zentrale Rolle spielt. DNA-Schäden können hierbei zu Änderungen der Expressivität der zellzyklusregulierender Gene führen. Daraus resultieren Änderungen im Ablauf der Zellteilung (Abb. 2-12).
- G1/S Zellzyklusblock: Nach DNA-Schädigung kommt es am Zellzyklusblock durch die Vermehrung des Tumor-Suppressor-Gens p53 entweder zur

Reparatur der geschädigten Zellen, oder falls eine Reparatur nicht möglich ist, zur Vermehrung geschädigter Zellen, woraus bösartige Hauttumore resultieren können.
- Apoptose: Nach DNA-Schädigung durch UV-Strahlung kann es, falls die Reparaturmechanismen der Zelle nicht ausreichen, zum programmierten Zelltod kommen (u. a. sunburn cells).

3.3.2 Erscheinungsformen von UV-bedingten Hauterkrankungen

An der Haut führt Sonneneinstrahlung bei Überschreitung einer individuell unterschiedlichen Schwellendosis zwingend zur Dermatitis solaris (Sonnenbrand = Erythem) (Abb. 2-8) sowie auch ohne vorherige sichtbare Rötung – zur Pigmentierung (Bräunung). Weiter gibt es UV-ausgelöste Hauterkrankungen (Photodermatosen), die schon bei geringer Sonnenexposition auftreten können. Sie entstehen durch die Existenz von photosensibilisierenden Substanzen, die äußerlichen oder innerlichen Ursprungs sein können. Zwei grundlegende Mechanismen werden unterschieden: Phototoxizität und Photoallergie. Bekannte Photosensibilisatoren, z. B. bei phototoxischer oder photoallergischer Dermatitis sind z. B. Bergamottöle, Johanniskraut, Furocumarine, Fenchel, Dill, Petersilie, Sellerie, Wiesenbärenklau und besonders wichtig: Viele Medikamente. Daneben gibt es aber auch nicht eindeutig zu benennende Photosensibilisatoren (idiopatisch), z. B. bei polymorpher Lichtdermatose oder Lichturtikaria.

Außerdem gibt es eine Reihe von grundsätzlich strahlungsabhängigen Hauterkrankungen, bei denen Sonnenlicht die Erscheinungen wesentlich verstärken kann, so z. B. bei Lupus erythematodes, Rosazea oder manchmal auch Psoriasis vulgaris.

Von diesen sich nach Sonnenbestrahlung mehr oder weniger rasch (Stunden bis Tage) entwickelnden Krankheitsbildern abzugrenzen sind Reaktionen mit jahre- oder jahrzehntelanger Latenz: In vielen Fällen ausschlaggebend für das Erscheinungsbild der alten Haut ist die so genannte Photoalterung. Während diese als kosmetische Beeinträchtigung angesehen werden kann, sind die Folgen der Photokarzinogenese wesentlich schwerwiegender, bei der durch UV-Strahlung maligne Hauttumoren induziert werden. Diese sind Basalzellkarzinom, Spinozelluläres Karzinom und dessen Vorstufe, die aktinische Präkanzerose, sowie das malignes Melanom.

Die Entwicklung von aktinischen Präkanzerosen, spinozellulären Karzinomen und teilweise auch Basalzellkarzinomen steht hauptsächlich im Zusammenhang mit der Sonnenstrahlungsdosis, die insgesamt im Laufe des Lebens in die Haut gelangt ist. Anders verhält es sich beim malignen Melanom: Hier scheint ein Zusammenhang mit schweren Sonnenbränden oder verstärkter Sonnenexposition im Kindes- und Jugendalter zu bestehen (WALTER et al. 1999).

Daraus resultiert, dass eine steigende UV-Belastung der Haut durch veränderte Freizeitgewohnheiten, wie Urlaube in südlichen Ländern mit starken Sonnenexpositionen, einen großen Risikofaktor darstellt. Aber auch die Benutzung von Solarien scheint ein Risikofaktor zu sein: In mehreren Studien fanden sich im Vergleich zu Kontrollpersonen signifikant mehr Benutzer von Sonnenbänken unter den Melanompatienten (WESTERDAHL et al. 2000). Die Benutzung von UV-A-Solarien soll für etwa 6 % der Todesfälle an malignem Melanom verantwortlich sein (DIFFEY 2003).

3.3.3 Statistik

Von 100 000 Einwohnern Deutschlands erkrankten (1996) 80 Personen an Basaliom, 25 Personen an spinozellulärem Karzinom und 12 an malignem Melanom. Etwa drei Viertel aller hautkrebsassoziierten Todesfälle sind durch das maligne Melanom verursacht, dessen Zuwachsrate höher ist als die aller anderen Krebsarten. Für München und Umgebung betrug die Inzidenz (Zahl der Neuerkrankungen) des malignen Melanoms pro 100 000 Einwohner und Jahr über den Zeitraum von 1990 bis 1993 gemittelt etwa 14, wohingegen die Inzidenz im Saarland für 1990 etwa 8 war. Wie stark hierbei unterschiedliches Freizeitverhalten eine Rolle spielt, müsste untersucht werden. In Mitteleuropa beträgt die Inzidenz derzeit 10 bis 12 Erkrankungen pro 100 000 Einwohner und Jahr, in den USA 10 bis 25 Erkrankungen und die höchsten Inzidenzen wurden mit 50 bis 60 Erkrankungen pro 100 000 Einwohner und Jahr in Australien berichtet (GARBE und BLUM 2001). Dies beruht nicht nur auf der hohen Strahlungsbelastung im äquatorialen Bereich sondern auch auf den Hauttypen der dortigen Bewohner, deren Vorfahren häufig Einwanderer waren. Berechnungen der Gesellschaft des epidemiologischen Krebsregisters in Deutschland e.V. in Zusammenarbeit mit dem Robert-Koch-Institut in Berlin (KATALINIC und HENTSCHEL 2006) ergeben, dass 2002 in Deutschland 6000 Männer und 7700 Frauen an einem Melanom erkrankten. Dagegen erkrankten in Deutschland im Jahre 2000 nur 5843 Männer und 6128 Frauen an einem malignen Melanom.

4 Konsequenzen

Nach derzeitigem Wissensstand ist die Gefährdung der menschlichen Gesundheit durch UV-Strahlung deutlich größer als deren positive Wirkung. Da die UV-Wirkung im Hinblick auf Sonnenbrand und Vitamin D in einem sehr ähnlichen Spektralbereich erfolgt, ist die Trennung nur über die Dosis zu erzielen, die für die Vi-

tamin-D-Bildung wesentlich geringer ist. Hier ist auf entsprechende Anpassung des Verhaltens der Bevölkerung zu hoffen, vielleicht zu erreichen durch verbesserte Information. Zwischen 1970 und 2000 hat die Zahl der Erkrankungen zwar um den Faktor drei zugenommen, die vermehrte Thematisierung der UV-Problematik in den letzten Jahren aber zu einer besseren Früherkennung geführt, so dass die Zahl der Hautkrebstoten 2000 nahezu wieder den Wert von 1970 hatte. Um die UV-Dosis zu reduzieren, kann die Bestrahlungsdauer und die wirksame Bestrahlungsstärke reduziert werden. Letzteres geschieht üblicherweise durch künstliche Maßnahmen, wie Schatten, Kleidung oder Sonnenschutzmittel. Aber auch die natürlichen Reaktionen der Haut wie Hautbräunung und Lichtschwiele stellen einen Schutz dar, sofern die Haut genügend Zeit mit geringer Bestrahlung hatte, um diesen Schutz aufzubauen.

Damit ist es ganz wesentlich, sonnenungewohnte Haut auch im Urlaub nur Schritt für Schritt der Strahlung auszusetzen und die Möglichkeiten zur Unterstützung der Reparaturmechanismen in der Zelle zu nutzen, zum Beispiel die Kombination der Antioxidantien d-alpha-Tocopherol und Acetylsalizylsäure (Vitamin E und C). Neuere Untersuchungen der Arbeitsgruppe PLACZEK et al. (2005) konnten zeigen, dass unter dreimonatiger Einnahme von Vitamin E und C sowohl das Sonnenbrandrisiko als auch die Entstehung von UV-bedingten DNA-Schäden herabgesetzt wird. Kleinkinder sollten jedoch grundsätzlich nicht der direkten Sonne ausgesetzt werden, da ihre Haut speziell sonnengefährdet ist. Die für die menschliche Gesundheit relevante solare UV-Strahlung steigt im Mittel von den Polen zum Äquator, da hier niedrige Ozonwerte und hoher Sonnenstand zusammenkommen, sowie mit der Höhe über dem Meeresspiegel. Dies sollte bei Reisen beachtet werden (siehe Kapitel 4: Medizin-Meteorologisches Informationsangebot). Durch die unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen unterliegt die UV-Strahlung aber starken Variationen, auch von Tag zu Tag, wobei die Effekte der Wolken die der Ozonvariation übersteigen. Ein weiterer Aspekt der UV-Strahlung ist deren große Bedeutung für luftchemische Prozesse, auf die im Rahmen dieses Artikels aber nicht eingegangen werden konnte.

In der ferneren Zukunft wird sich die Ozonschicht nach den vorliegenden Szenarien erholen und damit die Strahlung im UV-B-Bereich wieder reduziert werden. Die Umsetzung von internationalen Beschlüssen zur Reduktion der ozonschädigenden Gase scheint bereits heute erste Wirkung zu zeigen. Da aber die Ozonchemie stark temperaturabhängig ist, besteht in der CO_2-bedingten Temperaturabnahme in der Stratosphäre sowie der Änderung der Tropopausenhöhe ein neues Gefährdungspotential für die Ozonschicht. Insofern kann in Bezug auf die Risiken solarer UV-Bestrahlung für die menschliche Gesundheit keine Entwarnung gegeben werden, sondern die Entwicklung in der Zukunft muss weiterhin beachtet werden.

Hinzu kommt, dass Szenarien der Klimaänderung für Mitteleuropa in den Sommermonaten reduzierte Bewölkung vorhersagen. Hierdurch würde die UV-Tagesdosis zunehmen und könnte über das Freizeitverhalten zu vermehrter Sonnenexposition führen. Die so hervorgerufene Zunahme der Dosis gälte sowohl für den UV-B- als auch noch deutlicher für den UV-A-Bereich, da hier keine Reduzierung auf Grund der Ozonerholung eintreten kann. Damit rückt die Gefährdung der Haut durch UV-A verstärkt ins Blickfeld, ein Spektralbereich bei dem noch deutlicher Forschungsbedarf besteht.

Im Hinblick auf kosmetische Produkte wird diesem Aspekt aber bereits Rechnung getragen, da in Zukunft Sonnenschutzfaktoren sowohl für den UV-B- als auch den UV-A-Bereich angegeben werden müssen.

Danksagung

Die gezeigten mittleren Felder des UV-Index wurden vom Deutschen Wetterdienst erstellt, basierend auf Daten der NASA (http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone.html), entsprechend den Visualisierungsempfehlungen der WHO (2002).

Literatur

CIE, 2002: International Standard Global UV Index. CIE DS 013.2/E:2002.

DE GRAAF, M.P., STAMNES, P., TORRES, O., KOELEMEIJER, R.B.A., 2005: Absorbing Aerosol Index: Sensitivity analysis, applications to GOME and comparison with TOMS. *J. Geopyhs. Res.* **110,** D01201, pp.19, doi: 10.1029/2004JD005178.

DIFFEY, B.L., 2003: A quantitative estimate of melanoma mortality from ultraviolet sun-bed use in the U.K. *J. Dermatol.* **49** (3), 578-581.

DIN, 2000: DIN 5031-10, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik. Deutsches Institut für Normung, *Beuth-Verlag*, Berlin.

GARBE, C., BLUM, A., 2001: Epidemiology of cutaneous melanoma in Germany and worldwide. *Skin Pharmacol Appl Skin Physiol* **14**, 280-290.

HOEPPE, P., OPPENRIEDER, A., ERIANTO, C., KOEPKE, P., REUDER, J., SEEFELDNER, M., NOWAK, D., 2004: Visualization of UV exposure of the human body based on data from a scanning UV-measuring system. *Int. J. Biometeorology* **49** (1) 18–25.

KATALINIC, A., HENTSCHEL, S., 2006: Hautkrebs, Leukämien und Lymphone: Krebsregistrierung und Epideminologie. *Fachtagung „Strahlen und Krebs"*, 14.11.2006, Hamburg, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/tgung_krebs_strahlung_katalinic.pdf.

KIMLIN, M.G., PARISI, A.V., WONG, J.C.F., 1998: The facial distribution of erythemal ultraviolet exposure in south east Queensland. *Phys. Med. Biol.* **43** (2), 231 – 240.

KOEPKE, P., HESS, M., SCHULT, I., SHETTLE, E.P., 1997: Global Aerosol Data Set. *Max-Planck-Institut für Meteorologie*, Report **243**, 44 S.

KOEPKE, P., REUDER, J., SCHWANDER, H., 2002: Solar UV radiation and its variability due to the atmospheric components. *Recent Res. Devel. Photochem. Photobiol.* **6,** 11-34.

KOEPKE, P., MECH, M., 2005: UV irradiance on arbitrarily oriented surfaces: variation with atmospheric and ground properties. *Theor. Appl. Climatol.* **81**, 25 -32.

LINDFORS, A., VUILLEUMIER, L., 2005: Eythemal UV at Davos (Switzerland), 1926 – 2003, estimated using total ozone, sunshine duration and snow depth. *J. Geophys. Res.* **110**, D02104, 15 pp., doi: 10.1029/2004JD005231.

LODISH, H., BERK, A., MATSUDAIRA, P., BALTIMORE, D., ZIPURSKY, L., a. DARNELL, J., 1995: Molecular Cell Biology. Third Ed., *Scientific American Books*, New York.

DEN OUTER, P.N., SLAPER, H., TAX, R.B., 2005: UV radiation in the Netherlands. Assessing long-term variability and trends in relation to ozone and clouds. *J. Geophys. Res.* **110**, D02203, 11 pp., doi: 10.1029/2004JD004824.

PFEIFER, M.T., KOEPKE, P., REUDER, J., 2006: Effects of altitude and aerosol on UV radiation. *J. Geophys. Res.* **111**,

D01203, 11 pp., doi: 10.1029/2005JD006444.

PLACZEK, M., GAUBE, S., KERKMANN, U., GILBERTZ, K., HERZINGER, T., HAEN, E., PRZYBILLA, B., 2005: UVB-induced DNA damage in human epidermis is modified by the antioxidants ascorbic acid and d-alpha-tocopherol. *J. Invest. Dermatol.* **124**, 304-307.

SCHWANDER, H., KOEPKE, P., KAIFEL, A., SECKMEYER, G., 2002: Modification of spectral UV irradiance by clouds. *J. Geophys. Res.* **107**, D16, 0.1029/2001JD001297: AAC7-1 to AAC7-12.

STAIGER, H., KOEPKE, P., 2005: UV Index forecasting on a global scale. *Meteorol. Z.* **14**, 259-270.

TREPTE, S., WINKLER, P., 2004: Reconstruction of erythemal UV irradiance and dose at Hohenpeissenberg (1968-2001) considering trends of total ozone, cloudiness and turbidity. *Theoret. Appl. Climatol.* **77**, 159-171.

WALTER, S.D., KING, W.D., MARRET, L.D., 1999: Assocation of cutaneous malignant melanoma with intermittent exposure to ultraviolet radiation: results of a case-control study in Ontario, Canada. *Int. J. Epidemiol.* **28** (3), 418-421.

WESTERDAHL, J., INGVAR, C., MASBACK, A., JONSSON, N., OLSSON, H., 2000: Risk of cutaneous malignant melanoma in relationship to use sunbeds: further evidence for UV-A car cinogenicity. *Br. J. Cancer* **82** (9), 1593-1599.

WHO (2002): Global solar UV index: a practical guide. A joint recommendation of the World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations En-vironmental Programme, and the International Commission on Non-Ionizing Radia-tion Protection. *World Health Organization, Geneva*.

WMO (2003): Scientific assessment of ozone depletion in 2002. *Global Ozone Res Monitoring Project*, Report **47**, Geneva, Switzerland.

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 109-119 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

U. SCHLINK, U. KAMINSKI, O. HERBARTH, E. SCHULTZ

3 Atmosphärische Schadstoffe und Gesundheit sowie Luftqualität in deutschen Kurorten

Air Quality and Health as well as Air Quality in German Health Resorts

Zusammenfassung
Der lufthygienische Wirkungskomplex umfasst alle gesundheitlich relevanten Luftbeimengungen. Die Luftqualität ist sowohl in industriellen Zentren und Gebieten großer Bevölkerungsdichte wichtig, als auch in Kurorten, die der Rekonvaleszenz dienen. Die Bedeutung der Innenraumluft wird zunehmend erkannt, da sich die meisten Menschen überwiegend in Innenräumen aufhalten. Um Zusammenhänge zwischen Gesundheit und atmosphärischen Schadstoffen aufzudecken, benötigt man neben der Expositions- auch eine Wirkungsabschätzung. Letztere kann individuen- oder populationsbezogen erfolgen. Der vorliegende Artikel verdeutlicht dies anhand des Designs umweltepidemiologischer Studien und deren statistischer Analyse.
Der zweite Teil des Artikels beschreibt die Luftqualitätsmessungen, die der Deutsche Wetterdienst, Abteilung Medizin-Meteorologie in Freiburg, in Kurorten durchführt und geht auf bekannte Emissionsquellen ein. Die derzeitige Luftqualität in den Kurorten wird anhand der Leitkomponenten a) Grobstaub (gesamt), b) Grobstaub (schwarz) und c) Stickstoffdioxid (NO_2) an den Standorten Kurgebiet (Hintergrund), Ortszentrum (Bereich der dichtesten Bebauung) und Verkehrszentrum (Standort mit potentieller Belastung) dargestellt. Weiterhin wird auf die Feinstaubproblematik eingegangen, da in naher Zukunft auch in den Kurgebieten Feinstaub ($PM_{2.5}$) gemessen werden soll.

Abstract
Air quality factors comprise all solid, liquid and gaseous, natural and anthropogenic air pollutants which have an effect on human health outdoors and indoors. Air quality is important in industrial conurbations and overcrowded areas as well as recreational health resorts. Due to the fact that people stay most of their time indoors, the importance of indoor air conditions is increasingly realized . To detect associations between airborne pollutants and human health, both exposure assessment and effect assessment are required. The latter can be done individual-specific or population-specific. These techniques are presented here together with the design of epidemiological studies and their statistical analysis.
The second part of the paper deals with air quality measurements in health resorts, done by the German Meteorological Service, Division Medicine-Meteorology in Freiburg, and elaborates on well known emission sources. Present air quality in health resorts is represented by means of the guiding components a) coarse particles, b) coarse particles (black) and c) nitrogen dioxide (NO_2) at the locations spa area (background), city centre (densely built-up area) and traffic centre (location with a potential load). In addition the problem of fine particles will be discussed because also health resorts have to monitor the concentration of fine particles ($PM_{2.5}$) in the near future.

3.1 Atmosphärische Schadstoffe und Gesundheit (U. SCHLINK, O. HERBARTH)

3.1.1 Einleitung

Im *Lufthygienischen Wirkungskomplex* der Human-Biometeorologie werden alle gesundheitlich relevanten Immissionsbedingungen (feste, flüssige und gasförmige Luftbeimengungen aus natürlichen und anthropogenen Quellen) zusammengefasst. Diese hängen ab von den Emissionsquellen, den Transmissionsverhältnissen (Ausbreitung, Verdünnung, chemische Umwandlung, in cloud/below cloud scavenging), welche durch atmosphärische Schichtung, Wind, Niederschlag, Luftfeuchte und Sonnenstrahlung bestimmt werden. Zu diesem Wirkungskomplex gehören auch belästigende Einflüsse durch Geruch, Lärm und Wind. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Luftqualität und ihrer Wirkungen anhand umweltepidemiologischer Studien. Exemplarisch werden Arbeiten aus dem Department Expositionsforschung und Epidemiologie des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig vorgestellt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen Atemwegserkrankungen, Allergien und Störungen der Stoffwechselleistung, wobei Kindern besonderes Interesse gilt. Um Gesundheits- und Umweltbeobachtungen gewinnbringend zu verknüpfen, werden parallel zu den gesundheitlichen Effekten (physiologische bzw. biochemische Störungen oder klinische Endpunkte) die Expositionen im unmittelbaren Umfeld der Studienteilnehmer oder Patienten sowie deren innere Belastung untersucht.

3.1.2 Human-Expositionen

Zu den derzeit in den Industrieländern am intensivsten untersuchten Luftschadstoffen gehören Ozon, Schwebstaub und Kohlenwasserstoffe.

3.1.2.1 Bodennahes Ozon

Die EU Rahmenrichtlinie zur Luftqualität 1996/62/EC verpflichtet alle Mitgliedsstaaten zur Überwachung der Luftqualität. Für konkrete Schadstoffe wurden zusätzlich Tochterrichtlinien erlassen. Die Direktive 1999/30/EC definiert Grenzwerte für den Schutz vor Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Schwefeldioxid, Stickoxide, Schwebstaub und Blei. Die EU Rahmenrichtlinien sind in verbindliches nationales Recht umzusetzen (in Deutschland: Bundesimmissionsschutzgesetz, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft). Die Ozon-Direktive 2002/3/EC, die am 9. September 2003 in Kraft trat, legt nicht nur Grenzwerte fest (insbesondere für das Acht-Stunden-Mittel, für welches im Abschnitt 3.1.3.1 gesundheitliche Wirkungen erläutert werden), sondern beschreibt auch langfristig zu erreichende Ziele und Schwellwerte für die Information und Warnung der Bevölkerung. Entsprechend der Richtlinie 1997/101/EC sind alle Mitgliedsstaaten zum Austausch und zur jährlichen Offenlegung ihrer Daten verpflichtet.

Die Messung des troposphärischen Ozons ist seit vielen Jahren zu einem festen Bestandteil der routinemäßigen Überwachung der Luftqualität in Deutschland geworden. Neben der insbesondere bei Kaltlufteinbrüchen im Frühjahr auftretenden Einmischung ozonreicher stratosphärischer Luft in die Troposphäre, entsteht bodennahes Ozon als sekundärer Luftschadstoff vor allem in den Sommermonaten. Die photochemische Bildung von Ozon erfolgt in einer Verkopplung der schnell ablaufenden Photolyse von Stickstoffdioxid mit langsameren Reaktionszyklen, in denen u. a. Kohlenwasserstoffe und Hydroxylradikale eine wesentliche Rolle spielen (u. a. POPPE und ZIMMERMANN 2000). Neben dieser nichtlinearen photochemischen Reaktion erfolgt die Ausbreitung der Luftbeimengungen durch turbulente Prozesse. Nichtlineare Effekte sind also bei der Ozonentstehung sehr bedeutend. Sie könnten in den Zeitreihen der Ozonkonzentration in zwei Formen sichtbar werden.

Erstens als nichtlinearer Zusammenhang zwischen Ozon und meteorologischen Parametern sowie anderen Schadstoffkonzentrationen. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, dass die beobachteten Datenreihen der Ozonkonzentration einer deterministischen nichtlinearen Rekursionsgleichung folgen (KOCAK et al. 2000). Ein Beispiel für eine solche dynamische Nichtlinearität sind Datenreihen, die mit dem Lorenz-Modell erzeugt wurden. Die komplexe Variabilität der Daten wird hier durch ein relativ einfaches nichtlineares Gleichungssystem erklärt. Statistische Tests, die auf der Basis der nichtlinearen Zeitreihenanalyse (KANTZ und SCHREIBER 2000) entwickelt wurden, haben aber gezeigt, dass für 1-h- und 8-h-Mittelwerte der bodennahen Ozonkonzentration solche dynamischen Nichtlinearitäten nicht signifikant sind (HAASE et al. 2002). Dagegen sind nichtlineare Zusammenhänge zwischen der Ozonkonzentration und weiteren atmosphärischen Parametern (Temperatur, Luftfeuchte, Stickoxidkonzentration, Windgeschwindigkeit) offensichtlich und lassen sich vorteilhaft für eine statistische Ozonprognose mit Hilfe von Neuronalen Netzwerken oder verallgemeinerten Regressionsmodellen nutzen (SCHLINK et al. 2003). Aufgrund der komplexen Prozesse der bodennahen Ozonbildung und -anreicherung, geht man inzwischen von kurzfristigen Maßnahmen (Fahrverbote, Smogalarm) immer mehr zur langfristigen Reduzierung der Emission von Vorläufersubstanzen über. Für besonders sensible Personengruppen ist die kurzfristige Warnung jedoch weiterhin ein wesentliches Hilfsmittel der Vorsorge.

Wie wichtig lokale meteorologische Gegebenheiten für die menschliche Schadstoffbelastung sind, haben Ozonmessungen in Mendoza, Argentinien, gezeigt. Mendoza (32° 50' S, 68° 50' W, 750 m über NN) liegt am Ostrand der Anden und ist durch ein (semi-) arides Klima gekennzeichnet (Niederschlag 220 mm/Jahr), da es im Sommer in die Südamerikanische Hochdruckzone einbezogen ist. Das Klima und die intensiven Emissionen von Vorläufersubstanzen aus einer veralteten Fahrzeugflotte lassen eine hohe Ozonbelastung erwarten.

Während in Leipzig die Sommermaxima durchaus 250 µg/m³ überschreiten können, wurden in Mendoza die höchsten Stundenmittel des Ozons bei 120 µg/m³ im Süd-Winter beobachtet (SCHLINK et al. 1999). Grund ist ein besonders im Süd-Sommer intensives atmosphärisches Strömungssystem am Fuße der Pre-Cordilleren (vgl. auch ENDLICHER 1995). Dieses ventiliert tagsüber die urbane Luft, so dass keine gesundheitsrelevante Belastung entsteht. Nachts wird dann gelegentlich ozonreiche Luft aus den Bergen in die Stadt zurückbefördert (low level jet).

3.1.2.2 Schwebstaub

Schwebstaub bezeichnet winzige meist feste aber auch flüssige Partikel in der Atmosphäre. Abhängig vom aerodynamischen Durchmesser werden verschiedene Kategorien unterteilt: Gesamtschwebstaub (**t**otal **s**uspended **p**articles, TSP, ≤ 30 µm), inhalierbarer (thorakaler) Schwebstaub (PM_{10}, ≤ 10 µm), lungengängiger (alveolengängiger) Schwebstaub ($PM_{2,5}$, ≤ 2,5 µm) und Ultrafeinstaub (**ultraf**ine **p**article, UFP, ≤ 0,1 µm). Der aerodynamische Durchmesser eines Teilchens beliebiger Form entspricht dem Durchmesser einer Kugel mit einer normierten Dichte von 1 g/cm³, welche in ruhender Luft dieselbe Sinkgeschwindigkeit wie das betrachtete Teilchen hat. Messungen für PM_{10} und $PM_{2,5}$ (in µg/m³) umfassen nur Partikel, die einen größenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 bzw. 2,5 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist. Die Messverfahren wurden in Anlehnung an das Abscheideverhalten des menschlichen Atemtraktes entwickelt. PM_{10} wird zu et-

wa 50 % in der Luftröhre und den Bronchien (Tracheobronchialbereich) und $PM_{2,5}$ auch in den Lungenbläschen (Alveolen) abgelagert. Je kleiner die Partikel sind, desto tiefer können sie in die Atemwege vordringen. Ultrafeine Partikel, dazu gehören auch die sogenannten Nanopartikel, können möglicherweise sogar direkt in die Blutbahn übergehen und erreichen somit über die Blutzirkulation jedes Organ (LAHL und STEVEN 2005). Doch nicht nur die Partikelgröße, sondern auch die chemische Zusammensetzung ist für die gesundheitliche Bewertung maßgebend.

Üblicherweise untergliedert man die Partikel in natürlich oder anthropogen (vom Menschen) verursachte. Besonders in Städten spielen die anthropogenen Quellen (Industrieanlagen, Straßenverkehr) eine besondere Rolle; denn sie gelten hier als Hauptverursacher der Schwebstaubkonzentration (VDI und DIN Arbeitsgruppe 2003). Wie viele Partikel in der Luft verbleiben, hängt aber auch stark von den meteorologischen Bedingungen ab (LAHL und STEVEN 2005). In der Tochterrichtlinie 1999/30/EC der EU wurde zum 1.1.2005 die Begrenzung für die Belastung mit PM_{10} herabgesetzt. Es sind nur noch 50 µg/m³ PM_{10} im 24-Stunden-Mittel zugelassen. An maximal 35 Tagen im Jahr darf dieser Wert überschritten werden; im Jahresmittel muss ein Grenzwert von 40 µg/m³ eingehalten werden. Neuere Untersuchungen deuten darauf hin, dass auch die Anzahlkonzentration besonders für kardiovaskuläre Erkrankungen eine gesundheitsrelevante Größe ist (STÖLZEL et al. 2006). Sie wird wesentlich durch ultrafeine Partikel bestimmt. Da sich gezeigt hat, dass sowohl Anzahlkonzentrationen als auch Größenverteilungen der Partikel im urbanen Raum stark variieren (Korrelation der Stunden- und Tagesmittel verschiedener Fraktionen der Beobachtungen an zwei 1,5 km entfernt liegenden Messpunkten lagen nur zwischen 0,35 und 0,46; TUCH et al. 2006), erweist sich die Beweiskraft derzeitiger epidemiologischer Studien zum Zusammenhang von Partikelkonzentration und Gesundheitseffekten als begrenzt.

In diesem Zusammenhang ist die Verwendung von Messdaten, die ausschließlich in der Außenluft gewonnen wurden, ein weiteres Problem. Da sich in unseren Breiten die Menschen vorwiegend in Innenräumen aufhalten, kommt deren Luftbelastung eine essenzielle Bedeutung zu. Es wurde beobachtet (FRANCK et al. 2006), dass bei Abwesenheit von Innenraumquellen die Anzahlkonzentration innen geringer als außen ist und die Konzentrationsverhältnisse **i**ndoor/**o**utdoor (I/O) von der Partikelgröße abhängen. Die höchsten I/O Verhältnisse wurden bei kleiner Anzahlkonzentration in der Außenluft gemessen. Die Autoren empfehlen, bei epidemiologischen Untersuchungen ein gewichtetes Mittel aus Außen- und Innenbelastung zu verwenden.

Bei der Analyse der Wirkung von Luftschadstoffen auf die Gesundheit kommt den meteorologischen Bedingungen eine besondere Rolle zu. Letztere werden üblicherweise als Störgrößen (Confounder) in die statistische Untersuchung einbezogen. Es ist aber auch denkbar, dass die gesundheitlichen Effekte der Luftqualität durch die meteorologischen Bedingungen direkt modifiziert werden. Beispielsweise kann durch eine erhöhte absolute Luftfeuchtigkeit die negative Wirkung von Schwebstaub auf die Atemwege von Allergikern abgemildert werden (SCHLINK et al. 2007).

3.1.2.3 Luftschadstoffe im Innenraum (VOC)

Ein wesentlicher Bestandteil des lufthygienischen Wirkungskomplexes sind Luftschadstoffe des Innenraums, insbesondere leicht flüchtige organische Verbindungen (**v**olatile **o**rganic **c**ompounds, VOC). Ihre Bedeutung wächst u. a. durch die Verwendung von Baumaterialien und Einrichtungsgegenständen mit immer komplexer werdenden Inhaltsstoffen und die Reduzierung des Luftwechsels aus Energiespargründen. Obwohl Innenraumschadstoffe bereits seit einigen Jahren in die Wirkungsuntersuchungen einbezogen werden (z. B. DIEZ et al. 2000), ist es wichtig, die Variation der Immissionsbelastung zu berücksichtigen. Die Ergänzung einer umweltmedizinischen Untersuchung durch eine etwa vierwöchige passive Probenahme von VOC im Wohnraum des Patienten erweist sich als unzureichend, da Gesundheitsbeeinträchtigungen die Folge einer länger zurückliegenden und weitaus höheren Exposition sein könnten. Beobachtungen haben gezeigt, dass Luftschadstoffe im Innenraum einem Jahresgang folgen (für VOC siehe REHWAGEN et al. (2003), für Schimmelpilzsporen siehe HERBARTH et al. (2003)). Daten aus Wohnungen unterschiedlicher deutscher Großstädte bestätigten dieses Ergebnis (SCHLINK et al. 2004). Die Autoren geben Umrechnungsfaktoren an, mit denen man von einer monatlichen Konzentrationsmessung auf das Jahresmaximum oder andere Jahreskenngrößen hochrechnen kann.

3.1.3 Gesundheitseffekte

Studien der gesundheitlichen Wirkungen von meteorologischen Einflüssen (einschließlich Luftqualität) können allgemein eingeteilt werden in populationsbezogene und individuenbezogene Ansätze. Erstere messen die Wirkung anhand von aggregierten Maßen, wie z. B. die für eine spezifische Erkrankung oder ein Symptom beobachtete tägliche Anzahl von Krankenhauseinweisungen, Einsätzen der medizinischen Nothilfe oder dem Anteil erkrankter Individuen (die so genannte Prävalenz) in einer untersuchten Kohorte. Die untersuchten Personen werden dabei als repräsentativ für die interessierende Personengruppe angesehen und idealerweise aus dieser zufällig ausgewählt. Im Gegensatz dazu analysiert der individuenbezogene Ansatz die direkt an einzelnen Individuen beobachteten Wirkungen. Bei prospektiven Studien werden die Teilneh-

mer in exponierte und nicht exponierte aufgeteilt und anhand der sich einstellenden Gesundheitseffekte die Wahrscheinlichkeit bzw. Chance einer Wirkung bestimmt. Beim retrospektiven Studiendesign geht man dagegen von einer Gruppierung der Teilnehmer in so genannte Fälle und Kontrollen (z. B. aktuell erkrankte und gesunde) aus und eruiert die in der Vergangenheit vorgelegene Belastung.

Das zugrunde liegende statistische Modell (WHITTEMORE und KELLER 1979) geht davon aus, dass die Gesundheitssymptome durch atmosphärische Einflüsse, wie Luftschadstoffe oder plötzliche Temperaturwechsel, ausgelöst werden können. Ob es tatsächlich zur Auslösung kommt, ist wiederum abhängig von körpereigenen Schwellwerten, die mit den Umgebungsbedingungen täglich variieren können. Die mathematische Formulierung dieser Mechanismen ergibt das individuenbezogene logistische Modell für die Symptomwahrscheinlichkeit. Das Maß für das Gesundheitsrisiko ist bei beiden oben genannten Designs das Chancenverhältnis (**O**dds **R**atio, OR) zwischen der exponierten und nicht exponierten Situation. Unter einer Chance versteht man den Quotienten aus Symptomwahrscheinlichkeit und der Wahrscheinlichkeit keine Symptome zu entwickeln.

3.1.3.1 Panelstudien

In einer Panelstudie wird der Gesundheitszustand der Teilnehmer täglich erfasst (vgl. Abb. 3-1). Der zusätzliche Aufwand gegenüber einer einmaligen Datenerfassung bringt eine Reihe von Vorteilen:

- Jedes Individuum erfährt im Laufe der Zeit unterschiedlich starke Belastungen, so dass es als seine „eigene Kontrollgruppe" fungiert.
- Dies führt dazu, dass man das Gesundheitsrisiko für jedes Individuum persönlich berechnen kann und damit auch die interindividuelle Streuung berechenbar ist.
- Die Vielzahl von Daten macht die statistische Analyse sicherer.
- Da man Paneldaten auch zu täglichen Fallzahlen (Prävalenzen) zusammenfassen kann, stellt das Panel-Design eine „Brücke" zwischen individuen- und populationsbezogenen Studien dar.

Es konnte gezeigt werden, dass die aus Populationsdaten geschätzten Gesundheitsrisiken immer kleiner sind, als die Schätzwerte aus individuenbezogenen Daten, was durch die Verschiedenheit der einzelnen Individuen bewirkt wird. Abb. 3-2 verdeutlicht die interindividuelle Streuung des Umwelteffektes, der im Mittel $\overline{\beta}$ beträgt. Projiziert man diese Streuung (rot begrenzter Bereich) über die logistische Funktion in den Bereich der Symptomwahrscheinlichkeiten (p), bestimmt dort einen mittleren Wert und projiziert ihn in den Bereich der Umwelteffekte zurück (β^*, grün), so erhält man einen gegen Null verzerrten Wert ($|\beta^*| \leq |\overline{\beta}|$). Für den Vergleich von Gesundheitsrisiken,

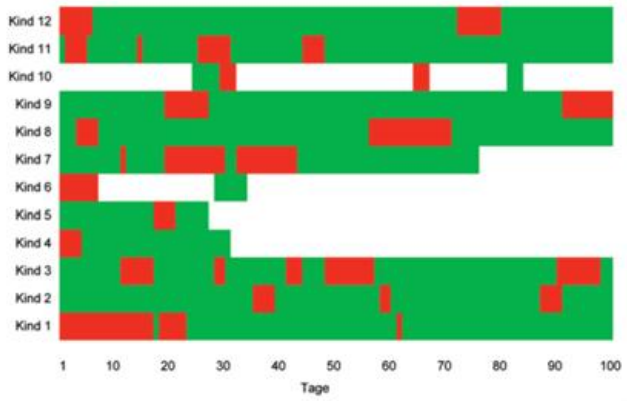


Abb. 3-1: Teil eines exemplarischen Panels, welcher die Symptome bei 12 Individuen innerhalb von 100 Tagen darstellt; Symptomtage sind rot und Symptomfreiheit grün gekennzeichnet; weiße Zellen repräsentieren Fehlwerte.

die mit unterschiedlichen Studien bestimmt wurden, kann man somit eine wichtige Schlussfolgerung ziehen: Mit einem populationsbezogenen Design beobachtet man immer ein abgeschwächtes Risiko (SCHLINK 2002).

Konkret wurde das oben beschriebene Paneldesign in einer Studie über 759 Tage mit 277 Vorschulkindern in Leipzig verwendet. Kinder sind für die untersuchten Atemwegssymptome eine besonders sensible Populationsgruppe (GOEHL 1997). Der Zustand der Atemwege wurde über ein Symptomtagebuch erfasst, welches die Eltern der Kinder ausfüllten. Fragen nach Schnupfen, laufender/verstopfter Nase, Erkältung, Heiserkeit, und Husten waren mit einem einfachen Ja/Nein zu beantworten. Alle angegebenen Einzelsymptome wurden zu einer Variablen „Atemwegssymptome" zusammengefasst.

Panelstudien leiden häufig unter „Drop out", d. h. ein Teil der Teilnehmer führt das Symptomtagebuch nicht kontinuierlich oder steigt vor dem Ende der Studie aus. Dies erzeugt Fehlwerte (vgl. Abb. 3-1). Da aber die Stärke der Umwelteinwirkung für jedes Individuum

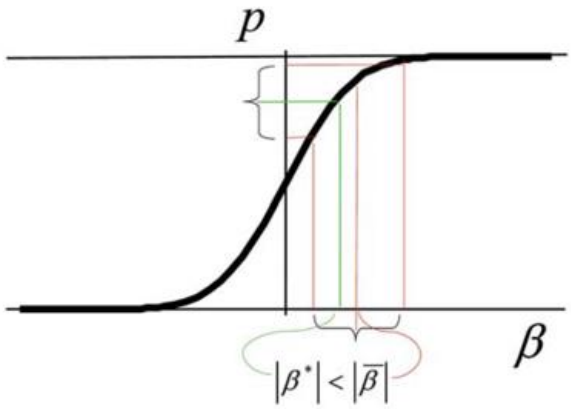


Abb. 3-2: Prinzipdarstellung der Risikoabschwächung durch die logistische Wirkungsfunktion.

separat berechnet wird, ergeben sich für Individuen mit vielen Fehlwerten breite Vertrauensbereiche (vgl. Kind Nr. 34 mit 36 in Abb. 3-3). Solche unsicheren Schätzer erhalten dann bei der Zusammenfassung der Wirkungen aller Individuen ein geringeres Gewicht. Die Einflüsse der Atmosphäre wurden in Form des Tagesmittelwertes der Konzentrationen jeweils von SO_2, NO_2 und Schwebstaub, des täglichen Maximums des achstündigen gleitenden Mittelwertes der Ozonkonzentration, der relativen Luftfeuchte (Dampfdruck als Alternative), der Tagessumme der Globalstrahlung und der täglichen Maximaltemperatur einbezogen. Diese Daten fanden auch in geglätteter und/oder zeitlich verschobener Form Verwendung. Weitere untersuchte Einflussfaktoren waren die Tageslänge und der Wochentag.

Über ein schrittweises Auswahlverfahren der Einflussvariablen, die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Einflussvariablen und die Anwendung von Signifikanztests und Gütekriterien gelang es, den individuellen täglichen Symptomzustand mit Hilfe eines Modells aus den Einflussvariablen zu erklären (Erklärungskraft etwa 80 %). Dieses Modell ist auch in der Lage, die saisonale Variation von Atemwegserkrankungen, die so genannte Meteorotropie, vorherzusagen (SCHLINK et al. 2002).

Es zeigte sich, dass die Umwelteinflüsse nur mit dem Einsetzen von Symptomen bei zuvor gesunden Kindern zusammenhängen. Individuen, die sich bereits im Symptomzustand befinden, setzen diesen mit einer konstanten Wahrscheinlichkeit fort oder beenden ihn. Der Einfluss der Temperatur erwies sich als nichtlinearer Langzeiteffekt: bei etwa 3 °C ist die Wahrscheinlichkeit von Atemwegssymptomen am größten, bei niedrigeren und höheren Temperaturen nimmt sie ab. Interessanterweise wird auch an den Wochentagen Donnerstag, Freitag und Sonntag eine erhöhte Symptomwahrscheinlichkeit beobachtet. Neben SO_2 vergrößert auch Ozon die Chance für Atemwegssymptome signifikant. Eine genauere Untersuchung von

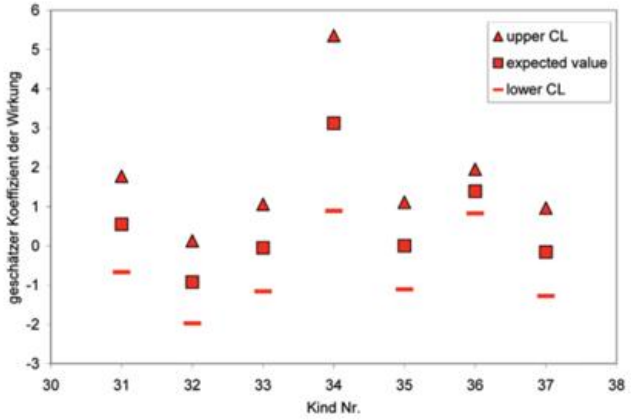


Abb. 3-3: Schätzung der Wirkung von bodennahem Ozon auf Atemwegssymptome an einzelnen Individuen; Erwartungswert (expected value), untere (lower CL) und obere Vertrauensgrenze (upper CL) bei 95 % Konfidenz.

Schwellwertüberschreitungen der Ozonkonzentration hat ergeben, dass sich signifikante Zusammenhänge zu Atemwegssymptomen erst oberhalb eines 8-Stunden-Mittelwertes von etwa 60 µg/m³ zeigen (Abb. 3-4). Dies deutet auf das Vorliegen einer Wirkungsschwelle hin (SCHLINK et al. 2006).

3.1.3.2 Zeitreihenstudien

Häufig wird die Wirkung der Luftqualität auf den Menschen anhand von täglich beobachteten Fallzahlen einer Krankheit oder eines Symptoms untersucht. Diese Zeitreihen beschreiben, wie die Gesundheit einer mehr oder weniger gut abgegrenzten Population mit Umweltparametern zusammenhängt, die für das Untersuchungsgebiet repräsentativ sind. Da es sich meist um den Beginn von Beschwerden handelt (Neuerkrankung, Inzidenz), tritt keine nennenswerte zeitliche Autokorrelation in den Gesundheitsdaten auf, weshalb Regressionsansätze (und nicht Zeitreihenmodelle) für die statistische Analyse verwendet werden. Weil Fallzahlen natürliche Zahlen sind, versucht man, sie über eine Poissonverteilung (evtl. mit Überdispersion) zu modellieren. Mit diesem Ansatz werden Risiken als **r**elative **R**isiken (RR) bestimmt, also als Verhältnis aus den Symptomwahrscheinlichkeiten bei vorliegender und nicht vorliegender Exposition. Obwohl das relative Risiko und das oben beschriebene Chancenverhältnis (OR) bei nicht zu großer Symptomwahrscheinlichkeit (≤ 10 %) näherungsweise gleich groß sind, bleibt natürlich der oben beschriebene Effekt der Abschwächung des an Populationen beobachteten Risikos wirksam. Als Beispiel für eine populationsbezogene Zeitreihenuntersuchung sei die Analyse der Wirkung von Schwebstaub auf Atemwegserkrankungen genannt (siehe auch WILSON et al. 2004). Im Krankenhaus der an der Do-

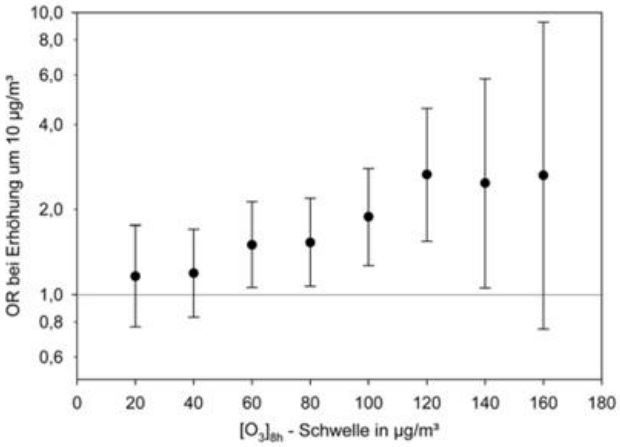


Abb. 3-4: Chancenerhöhung (OR) für Atemwegssymptome bei Kindern bei einer Erhöhung der Ozonkonzentration um 10 µg/m³ für unterschiedliche Schwellwertüberschreitungen des 8-Stunden-Mittelwertes der Ozonkonzentration; OR = 1 bedeutet keine und OR > 1 eine schädigende Wirkung; schließt der Vertrauensbereich die 1 ein, ist die Risikoerhöhung nicht signifikant.

nau gelegenen Stadt Drobeta–Turnu Severin wurden zu diesem Zweck vom 1.1.2000 bis 31.1.2003 tägliche Einweisungszahlen für chronische Bronchitis, chronisch obstruktive Bronchitis und Asthma aufgezeichnet. Drobeta-Turnu Severin liegt im südwestlichen Rumänien und ist Hauptstadt der Region Mehedinţi (etwa 103 000 Einwohner). Die meteorologischen Daten stammen vom Wetterdienst in Drobeta-Turnu Severin und die Tagessummen des Schwebstaubes (TSP) von der Gesundheitsbehörde Mehedinţi.

Im Folgenden werden die Resultate exemplarisch für den statistischen Zusammenhang zwischen TSP und Asthma erläutert (SCHLINK et al. 2007). In Abb. 3-5 sind die relativen Risiken (RR) bezüglich der Schwellwerte 0, 10, 20, ..., 170 µg TSP/m³ abgetragen. Der graue Plot repräsentiert das RR, wenn TSP die angegebene Schwelle übersteigt; z. B. wurden beim Schwellwert 60 alle Tage mit einer TSP-Belastung ≥ 60 µg/m³ in die Analyse einbezogen. Das relative Risiko wurde für einen Anstieg von 10 µg TSP/m³ berechnet und beträgt für eine Krankenhauseinweisung etwa 1,018, d. h. eine Zunahme der Asthma-Einweisungen um 1,8 % je 10 µg TSP/m³.

Analysiert man den Einfluss des Produktes aus TSP und gleichzeitig beobachteter absoluter Luftfeuchte (absHum) – man spricht jetzt von einer Modifikation des TSP-Effekts durch die Luftfeuchte – so hat dieser Faktor eine schützende Wirkung, denn das relative Risiko der Modifikation ist etwa 0,998 für einen festen Wert von TSP und einen Anstieg von 1 g H_2O/m³. In Abb. 3-5 zeigt der blaue Plot das durch die absolute Luftfeuchte modifizierte relative Risiko. Das gesamte RR von TSP und Wechselwirkung (absHum·TSP) ergibt sich aus dem Produkt beider Risiken. Für 60 µg TSP/m³ ist RR (TSP) ≈ 1,018 und RR (abs Hum·TSP) ≈ 0,998. Somit ist für TSP-Werte größer als 60 µg das relative Risiko

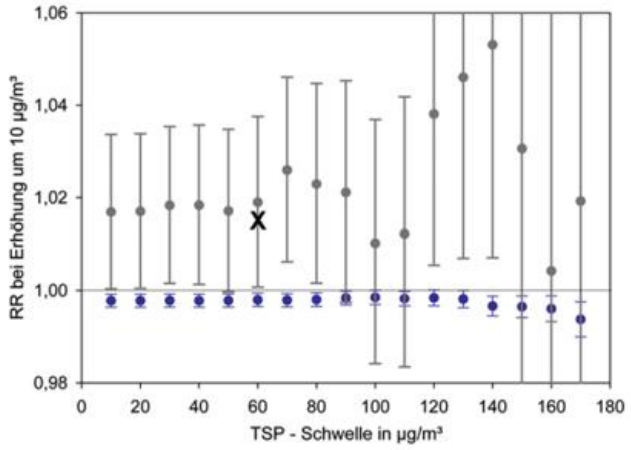


Abb. 3-5: Risikoerhöhung (RR) für eine Krankenhauseinweisung wegen Asthma bei einer Erhöhung der TSP-Konzentration um 10 µg/m³ für unterschiedliche Schwellwertüberschreitungen der TSP-Konzentration. RR = 1 bedeutet keine, RR > 1 eine schädigende und RR < 1 eine protektive Wirkung; schließt der Vertrauensbereich die 1 ein, ist die Risikoabweichung von 1 nicht signifikant. Erläuterung im Text.

1,018·0,998 ≈ 1,016 bei einem Anstieg um 10 µg TSP/m³ (in Abb. 3-5 markiert durch das schwarze Kreuz). Es ist auch ersichtlich, dass ein Schwellwert weder für die Wirkung von TSP noch für den Einfluss der Luftfeuchte auf die Einweisungshäufigkeit feststellbar ist.

Die protektive Wirkung der Luftfeuchte könnte durch eine höhere Widerstandsfähigkeit feuchterer Schleimhäute erklärt werden. Andererseits kann auch das intensivere Feuchtewachstum der Partikel oberhalb der Deliqueszenz-Feuchte (TANG et al. 1993) deren Grössenverteilung so verändern, dass der lungengängige und schädigende Anteil an Staub bei hoher Luftfeuchte stark reduziert wird und somit bei feuchter Witterung den inhalierbaren Größenbereich verlässt und in der Lunge nicht wirksam werden kann.

3.1.4 Schlussfolgerungen

Bei der Abschätzung von Gesundheitsrisiken durch Luftschadstoffe spielt das Design der epidemiologischen Untersuchung eine wesentliche Rolle. Die Analyse von populationsbezogenen Größen liefert gegenüber der Analyse individuenbezogener Merkmale ein abgeschwächtes Risiko. Dies sollte bei Vergleichen der Wirkung beachtet werden. Die zitierten Arbeiten unterstreichen die Bedeutung von Wetterparametern (Temperatur, Luftfeuchte, usw.) für die Schadwirkung der Luftverschmutzung, sei es als Langzeiteinfluss oder als Modifikator der Wirkung. Die Erforschung dieser komplexen, multifaktoriellen und kumulativen Effekte ist eine wichtige Aufgabe für die Zukunft.

3.2 Luftqualität in deutschen Kurorten (U. KAMINSKI, E. SCHULTZ)

3.2.1 Einleitung

Die Anerkennung von Kurorten und Erholungsorten ist in Deutschland durch Kurortgesetze und -verordnungen der Bundesländer geregelt. Messmethoden und Richtwerte sind in den „Qualitätsstandards für die Prädikatisierung von Kurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen“ (DHV 2005) und einer VDI-Richtlinie (VDI 3787-10 2006) niedergeschrieben. Im internationalen Vergleich durch den **E**uropäischen **H**eilbäder**v**erband (EHV) hat Deutschland mit einer Anzahl von 291 die meisten Kurorte (Angaben von 2006).

An die Luftqualität in Kurorten werden besondere Anforderungen gestellt, die von den Antragstellenden Gemeinden nachzuweisen sind. Die Luftqualitätsmessungen in Kurorten werden überwiegend durch den **D**eutschen **W**etter**d**ienst (DWD) durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Messungen erstellt der DWD für den Kurort ein amtliches Luftqualitätsgutachten, das eine Empfehlung ausspricht, ob eine Prädikatisierung aus lufthygienischer Sicht befürwortet wird oder nicht. Im

Zeitraum Mitte 2003 bis 2006 wurden 123 Gutachten erstellt. Bei 33 Gutachten wurde entweder empfohlen eine Prädikatisierung nur mit Einschränkungen auszusprechen oder in Einzelfällen auch eine Prädikatisierung abzulehnen, da Kurzzeit- oder Langzeitrichtwerte überschritten wurden. Die Kurzzeit-Richtwerte dürfen am jeweiligen Standort während des Messzeitraums bei einer Exposition von sieben Tagen (Grobstaub) nicht mehr als dreimal bzw. bei 14-tägiger Exposition (NO_2, Benzol) nicht mehr als zweimal überschritten werden. Eine unzulässige Überschreitung eines Langzeit-Richtwertes liegt vor, wenn der Ausschöpfungsgrad > 100 % beträgt und der gemessene Mittelwert einschließlich des 95 %-Vertrauensintervalls über dem Langzeit-Richtwert liegt. Das Prädikat selbst wird von der zuständigen Anerkennungsbehörde des jeweiligen Bundeslandes erteilt.

3.2.2 Messmethoden

Aus Kostengründen und um den Probenwechsel auch von ungeschultem Personal durchführen zu lassen, werden bei den Luftqualitätsmessungen Passivsammelverfahren eingesetzt (DIETZE et al. 2006): Diffusionsröhrchen für das Sammeln von NO_2 und Benzol (DIN EN 13528-3 2001) und der Sedimentationssammler Sigma-2 für die Probenahme von Grobstaub auf Haftfolien (VDI 2119-4 1997). Die Probenahmedauer beträgt für alle Komponenten 7 bzw. 14 Tage, die gesamte Messdauer 1 Jahr.

Die NO_2-Bestimmung erfolgt ionenchromatographisch, Benzol wird gaschromatographisch nachgewiesen, wobei Benzol aber nur gemessen wird, wenn die Vorbeurteilung der Luftqualität Hinweise auf eine erhöhte Belastung ergibt. Der Grobstaub wird mikroskopisch mit einer automatischen Einzelpartikelanalyse untersucht, die auch eine gewisse stofflich differenzierte Charakterisierung der Staubbelastung in den Gemeinden zulässt. Es können auf diese Weise anfärbbare Bioaerosole (Pollen, Sporen, Pflanzenepithelien usw.), transparente mineralische Komponenten und schwarze Partikel, wie z. B. Reifenabrieb, sowie leichtlösliche Bestandteile, wie z. B. Seesalz, unterschieden werden. Zusätzlich liefert die Einzelpartikelanalyse die Größenverteilung der verschiedenen Partikel. Die Messdaten werden durch Vergleichsmessungen in einem bundesweiten Referenzmessnetz abgesichert. Hier werden an Stationen des Umweltbundesamtes, der Ländermessnetze und des Deutschen Wetterdienstes die gleichen Messungen wie in den Kurorten durchgeführt und diese Ergebnisse mit den Messungen dieser Institutionen verglichen. Da die Messungen zum Teil mit anderen Messverfahren erzielt wurden, erlauben diese Vergleiche eine Validierung und Qualitätssicherung der eigenen Daten. Durch die Vergleichsmessungen wurden für die NO_2–Passivmessungen standortabhängige (Verkehrs-, Ortszentrum-, Hintergrundmessstelle) Abweichungen gefunden (DIETZE et al. 2006), die auf Querempfindlichkeiten der Aktivmessungen zurückgeführt werden können (unzureichende Konvertierung bei Molybdänkonvertern).

Die Passivmessungen zeigen an Verkehrsmessstellen einen Mehrbefund von über 20 % und an Hintergrundmessstellen einen Minderbefund von etwa 10 %. Für das Benzol ergab der Vergleich während des Messzeitraums eines Jahres für die Aktivmessung eine mittlere Konzentration von 0,73 ± 0,51 µg/m³ und für die Passivmessung 0,82 ± 0,59 µg/m³. Die berechnete mittlere Grobstaubkonzentration ($PM_{10-2,5}$) aus Passivmessungen betrug 6,18 ± 2,09 µg/m³, die aus den Aktivmessungen 5,08 ± 1,30 µg/m³. Feinstaubmessungen in Kurorten sind zwar noch nicht vorgeschrieben, werden aber vom DWD im Rahmen eines Forschungsprojektes an 15 ausgewählten Standorten nach einer Aktivmethode mit Hilfe von **Mini-V**olumenstrom-**S**ammlern (MiniVS) durchgeführt (BECKER et al. 2006). Der Vergleich der wöchentlichen Messung ($PM_{2,5}$) mit diesen Geräten ergab gegenüber der täglichen Messung mit „Low-Volume" Standard-Sammlern einen leichten Minderbefund von etwa 10 %. Diese Abweichung kann auf Verluste leichter flüchtiger Bestandteile zurückgeführt werden. Zu diesen Bestandteilen zählt insbesondere das Ammoniumnitrat (NH_4NO_3).

Die Staubmassenkonzentration wird durch Wägung der Staubfilter des MiniVS bestimmt. Als Staubinhaltsstoffe werden leichtlösliche Mineralsalze, wie z. B. das NH_4NO_3, mit Hilfe der Ionenchromatographie und der schwarze Kohlenstoffanteil (Russ) mittels eines optischen Verfahrens (Immersionsmethode) bestimmt. Die Standorte für die Luftqualitätsmessungen werden nutzungsabhängig im Aufenthaltsbereich der Kurgäste ausgewählt. Die Messungen sollen repräsentative Ergebnisse liefern zur Beurteilung (a) der Hintergrundkonzentration vorzugsweise im Anwendungsbereich des ortsgebundenen Heilmittels, d. h. im Kurgebiet, (b) im Ortszentrum im Bereich der dichtesten Wohnbebauung ohne unmittelbaren Verkehrseinfluss und (c) im Verkehrszentrum an einem verkehrsreichen Standort im Ortszentrum.

3.2.3 Emissionsquellen

Potenziell schädigende Immissionen in Kurorten und Erholungsorten werden lokal vor allem durch Kraftfahrzeuge, Heizanlagen und gewerbliche Emittenten verursacht. Für den Kurgast störende und belästigende Staubemissionen entstehen durch eine verkehrsbedingte Staubaufwirbelung sowie durch verstärkte Winderosion. Großräumige Verfrachtungen, insbesondere von gasförmigen Luftbeimengungen und Feinstaub, können ebenfalls erheblichen Einfluss auf die örtliche Luftqualität haben. Letztere sind durch lokale Maßnahmen nicht zu beeinflussen. Gleichwohl müssen sie bei der Gesamtbeurteilung

der Luftgüte als externe Einflüsse erkannt und mit berücksichtigt werden.

Als Leitsubstanzen für die Immissionen des Verkehrs gelten Stickstoffdioxid (60 % stammen aus dem Verkehr), Benzol (90 % Verkehr) sowie Staub einschließlich Ruß. Der Grobstaub > $PM_{2,5}$ enthält hauptsächlich aufgewirbelte Mineralpartikel oder Abriebprodukte wie z. B. Reifen- und Straßenabrieb. Der Feinstaub hingegen besteht vorwiegend aus Ammoniumsulfat- bzw. Ammoniumnitratpartikel, die durch eine Partikelbildung aus den Vorläufergasen, wie z. B. Ammoniak (Quelle: Landwirtschaft und Autokatalysatoren), NO_2 (Quelle: Auto) und SO_2 (Quelle: Kraft- und Fernheizwerke, Industriefeuerungen) entstehen. Hinzu kommen Verbrennungspartikeln, wie z. B. der als krebserregend geltende Dieselruß.

Die Feinstaubmessung mit Aktivsammelverfahren stellt bei der Beurteilung der Luftqualität in den Kurorten eine wichtige Ergänzung zur Grobstaubmessung mit dem Passivsammler Sigma-2 dar. Das liegt zum einen an der besonderen gesundheitlichen Relevanz des Feinstaubes $PM_{2,5}$, zum anderen wird durch die Kombination beider Messverfahren das gesamte Partikelspektrum erfasst einschließlich des störenden und belästigenden Grobstaubes.

Als zusätzliche Komponente im Grobstaub wird in den Kurorten der Jahresgang der Pollenkonzentration bestimmt. Diese Information kann für die Pollenallergiker unter den Kurgästen von erheblichem Interesse sein. In Seeheilbädern und Seebädern an der Nordsee ist als Heilfaktor eine ausreichende Salinität des Aerosols nachzuweisen. Die Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Variation des Seesalzgehaltes der Luft ist für die gezielte Anwendung des Seeklimas als Heilmittel von großer Bedeutung.

3.2.4 Derzeitige Luftqualität

3.2.4.1 Grobstaub

Der Grobstaub charakterisiert die lokale Belastungssituation. Durch Emissionsminderungsmaßnahmen sind diese Konzentrationen in den letzten Jahren besonders deutlich zurückgegangen. Neben einer wahrnehmbaren Verschmutzung führt der Grobstaub auch zur Reizung der Augen und oberen Atemwege und wird deswegen vom Kurgast als störend und belästigend empfunden. Außerdem enthält der Grobstaub in Form von Pollen, Sporen und Reifenabrieb auch gesundheitlich nachteilige Bestandteile, die als Allergieauslöser wirken können. Andererseits zeichnet sich der Grobstaub auch durch therapeutisch wirksame Bestandteile wie das Seesalz aus. Die Konzentrationen des Grobstaubes zeigen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten **V**erkehrs**z**entrum (VZ), **O**rts**z**entrum (OZ) und **K**ur**g**ebiet (KG). Während im Verkehrszentrum erhöhte Konzentrationen auftreten können (Abb. 3-6), sind die Konzentrationen im Kurgebiet durchweg gering und zeigen keine Korrelation zum Standort Verkehrszentrum. Grund hierfür ist die geringe Aufenthaltsdauer der Grobstaubpartikel in der Atmosphäre. Aufgrund ihrer Größe fallen sie, bedingt durch die Schwerkraft, nahe ihrer Entstehungsquelle rasch wieder zurück auf den Boden. Die Abb. 3-7 zeigt die Jahresmittel der Grobstaubkonzentration für 180 Messstellen in Kurgebieten im Zeitraum 2000-2004, sortiert nach dem Konzentrationsniveau für das Kurgebiet (dunkle Balken) und 192 Messstellen im Verkehrszentrum (helle Balken). Die jeweils gestrichelten waagerechten Linien stellen das 95 %-Perzentil dar und geben den vorgegebenen Richtwert an, der für eine Prädikatisierung eingehalten werden muss. Zeigt die Messung, dass dieser Richtwert an einer Repräsentanz nicht eingehalten wird, gibt das Gutachten die Empfehlung das Prädikat nicht zu erteilen. Im Kurgebiet liegen die Jahresmittelwerte für Grobstaub zwischen 4 und 13 µg/m³ Luft, im VZ zwischen 7 und 38 µg/m³ Luft. Der Anteil der schwarzen Partikel im Grobstaub erreicht im Jahresmittel im Kurgebiet 0,2–2,2 µg/m³ Luft (dunkle Balken Abb. 3-8) und im Verkehrszentrum 0,8–7,6 µg/m³ Luft (helle Balken Abb. 3-8). Damit liegt der Anteil der

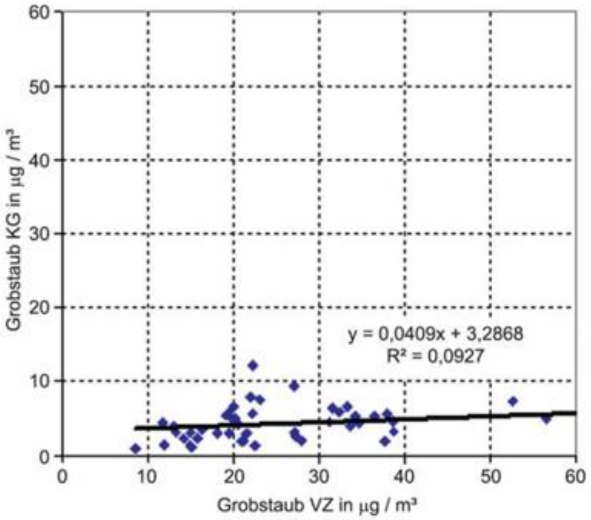


Abb. 3-6: Korrelation Grobstaub im Verkehrszentrum mit Grobstaub im Kurgebiet.

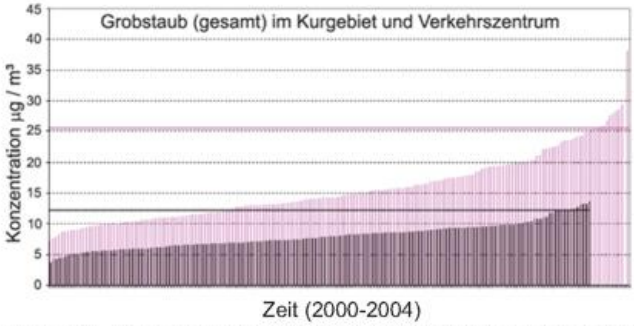


Abb. 3-7: Nach der Konzentration sortierte Jahresmittelwerte des Grobstaubes von 180 Messstellen im Kurgebiet (dunkle Balken) und 192 Messstellen im Verkehrszentrum (helle Balken), 2000-2004.

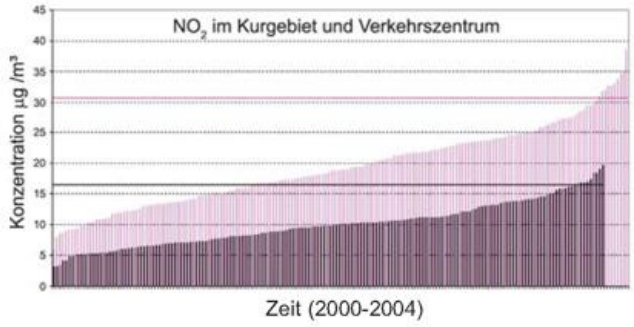


Abb. 3-8: Nach der Konzentration sortierte Jahresmittelwerte des Grobstaubes (schwarz) von 180 Messstellen im Kurgebiet (dunkle Balken) und 192 Messstellen im Verkehrs-zentrum (helle Balken), 2000-2004.

schwarzen Partikel am Grobstaub im Kurgebiet zwischen 9 und 17 % und im Verkehrszentrum zwischen 11 und 20 %. Typischerweise wird der Richtwert nur in den Kurorten mit einer erhöhten Verkehrsbelastung überschritten. Ursache ist meist ein Durchgangsverkehr mit hohem Schwerlastanteil. Von den Gemeinden wird der entsprechende Hinweis in den Gutachten des DWD oft erfolgreich dazu genutzt, im Verkehrswegeplan des jeweiligen Landes eine Höherstufung der Pläne zum Bau einer Umgehungsstraße oder anderer Maßnahmen zu erreichen.

3.2.4.2 Feinstaub

Partikel des Feinstaubes gelten nach neuem wissenschaftlichem Erkenntnisstand als gesundheitlich besonders relevant. Sie werden von der Weltgesundheitsorganisation (WHO 2004) als kritischer Luftschadstoff eingestuft, weil sie aufgrund ihrer geringen Größe verstärkt eingeatmet werden und in die tieferen Atemwege bis zu den Alveolen gelangen können. Eine besondere Bedeutung kommt dem Feinstaub auch deshalb zu, weil in ihm der als besonders gefährlich geltende Verbrennungsruß (Diesel) enthalten ist. Alle Langzeitstudien zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Zunahme der Sterblichkeitsrate und der PM-Konzentration (POPE und DOCKERY 2006 und CHOW et al. 2006). Im Gegensatz zum Grobstaub können diese kleinen Partikel mehrere Tage in der Atmosphäre verweilen und mit der Luftströmung über größere Distanzen verfrachtet werden. Aus diesem Grund verwischt sich beim Feinstaub auch die Standortabhängigkeit (Abb. 3-9). Die Feinstaub-Konzentrationen beider Standorte VZ und KG sind signifikant miteinander korreliert. Ein belasteter Ort hat im Verkehrszentrum aber immer noch höhere Feinstaubwerte, die im Vergleich zum Kurgebiet insbesondere auf einen höheren Russanteil zurückzuführen sind. Ein Hinweis darauf, dass der Verkehr eine wesentliche Feinstaubquelle darstellt. Nach vorläufigen Ergebnissen des noch laufenden Feinstaubprojektes liegen die Jahresmittelwerte der Feinstaubkonzentrationen in den Kurorten unter 20 µg/m³. Eine hohe Korrelation mit der Feinstaubkonzentration zeigen sowohl die parallel gemessenen Benzol- als auch NO_2-Konzentrationen. Beide Komponenten können ebenfalls als „Tracer" für den Verkehr angenommen werden.

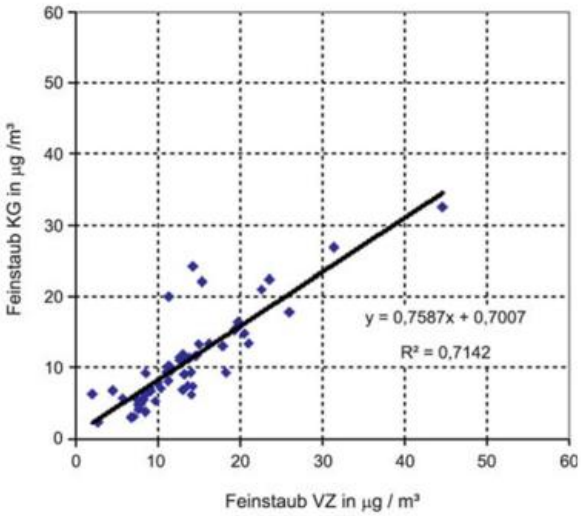


Abb. 3-9: Korrelation Feinstaub im Verkehrszentrum mit Feinstaub im Kurgebiet.

3.2.4.3 Stickstoffdioxid (NO_2)

Da Benzol nur in Ausnahmefällen gemessen wird, ist NO_2 immer noch die Leitkomponente für den Verkehrseinfluss. Die NO_2-Konzentrationen im Kurgebiet liegen im Jahresmittel zwischen 3 und 20 µg/m³ (dunkle Balken Abb. 3-10) und im Verkehrszentrum zwischen 6 und 38 µg/m³ Luft (helle Balken Abb. 3-10). Gerade der Durchgangsverkehr mit einem zunehmenden Schwerlastanteil aber auch ein verstärkter Ausflugsverkehr bereiten den touristisch interessanten Kurorten immer größere Probleme. Sollte die Verkehrsbelastung auch in den Kurorten weiter zunehmen, ist nicht auszuschließen, dass nicht nur Probleme mit der Einhaltung der geltenden Luftqualitätsrichtwerte für Kurorte sondern in einzelnen Fällen auch Überschreitungen der gesetzlichen Immissionswerte drohen.

3.2.5 Schlussfolgerungen

Die Luftqualitätsmessungen und amtlichen Gutachten

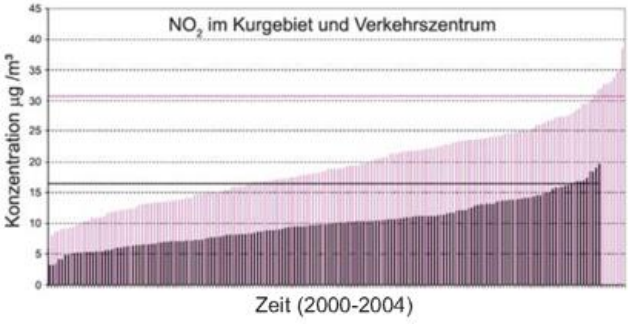


Abb. 3-10: Korrelation Feinstaub im Verkehrszentrum mit Feinstaub im Kurgebiet, vgl. Abb. 3-7.

des DWD sind für die Kurorte ein wichtiges Instrument zur Qualitätssicherung und Vermarktung ihres Angebotes. Eine hohe Luftqualität stellt nicht nur für Kurorte, die das Klima als so genanntes ortsgebundenes Heilmittel anbieten (Luftkurorte, Heilklimatische Kurorte, Seeheilbäder) ein wichtiges Merkmal dar, mit dem sie sich von der heimatlichen Umgebung und den Arbeitsbedingungen der meisten Kurgäste abheben können. Auch die übrigen Bäder und Kurorte sollten die Luftqualität als besonderes Merkmal eines Aufenthaltes am Kurort herausstellen. Eine Befragung von Kurgästen durch die Universität Wien ergab, dass der Wunsch nach einer sauberen, intakten Umwelt für den gesundheitsorientierten Gast gleich nach der Gesundheit an zweiter Stelle steht. Die Luftqualität in Kurorten ist in Deutschland überwiegend noch als gut, in einigen Bereichen (Küste, Hochlagen) sogar als sehr gut zu bezeichnen. Die staatliche Luftreinhaltepolitik hat auch in den Kurorten seit den 60er Jahren zu einer wesentlichen Verbesserung geführt. Durch Verdrängung von Kohle und Holz durch Öl und Gas bei den privaten Heizungen sowie schadstoffärmerer Kraftstoffe und Maßnahmen zur Abgasreinigung bei den Kraftfahrzeugen konnten die Immissionen auch im ländlichen Raum gesenkt werden. Der zunehmende Anteil von Dieselfahrzeugen an der Fahrzeugflotte sowie der Trend zu immer größervolumigeren Motoren haben diesen Trend beim Verkehr seit Ende der 90er Jahre jedoch zum Stillstand gebracht. Trotz Katalysatortechnik geht z. B. die NO_2–Konzentration nicht mehr weiter zurück (UBA 2006). Kontraproduktiv für die Kurorte wirkt sich die augenblickliche Rückkehr zu den Holzheizungen aus. Auch Pelletheizungen schneiden im Vergleich zum Erdgas in der Schadstoffbilanz deutlich schlechter ab (UBA 2006). Für die Kurorte können durch diese Entwicklungen in Zukunft wieder größere Probleme entstehen, geltende Richtwerte einzuhalten. Eine Wende können die Kurorte alleine nicht herbeiführen. Lokale Maßnahmen reichen nicht aus, sondern hier sind auch staatliche Maßnahmen gefordert, die aktuelle Fehlentwicklungen stoppen und damit zu einer Trendumkehr beitragen.

Danksagung

Die Autoren danken den Herren M. Fricker, V. Dietze, M. Goltzsche und C. Haller für die Auswertung der Proben und die Aufbereitung der Messergebnisse.

Literatur

BECKER, P., WOLF-BENNING, U., KAMINSKI, U., VOGT, I., 2006: INMEKO-II – Neues Konzept für die Messungen in Kurorten. *Heilbad und Kurort* **7-8**, 135-138.

CHOW, J.C., WATSON, J.G., MAUDERLY, J.L., COSTA, D.L., MARRACK, D., HEUSS, J.M., WOLFF, G.T., POPE, III C.A., DOCKERY, D.W., 2006: Critical Review Discussion: Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* **56**, 1368-1380.

DHV, 2005: Begriffsbestimmungen – Qualitätsstandards für die Prädikatisierung von Kurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen, *Deutscher Heilbäderverband e.V. Bonn*, 12. Auflage.

DIETZE, V., FRICKER, M., GOLTZSCHE, M., SCHULTZ, E., 2006: Luftqualitätsmessungen in deutschen Kurorten. Teil 1: Methodik und Absicherung. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* **66** (1/2), 45-53.

DIEZ, U., KROESSNER, T., REHWAGEN, M., RICHTER, M., WETZIG, H., SCHULZ, R., BORTE, M., METZNER, G.,

KRUMBIEGEL, P., HERBARTH, O., 2000: Effects of indoor painting and smoking on airway symptoms in atopy risk children in the first year of life - results of the LARS-study. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* **203** (1), 23-28.

DIN EN 13528-3 Entwurf, 2001: Passivsammler zur Bestimmung der Konzentration von Gasen und Dämpfen, Teil 3: Anleitung zur Auswahl, Anwendung und Handhabung. Berlin.

ENDLICHER, W., 1995: Zur Witterungsklimatologie von Nordwestargentinien. In: *Marburger Geographische Schriften* **128**, 17.

FRANCK, U., TUCH, T.M., MANJARREZ, M., WIEDENSOHLER, A., HERBARTH, O., 2006: Indoor and Outdoor Sub-Micrometer Particles: Exposure and Epidemiologic Relevance ("The 3 Indoor Ls"). *Environmental Toxicology* **21** (6), 606-613.

GOEHL, T.J., 1997: Playing in the sand (editorial). Environmental *Health Perspectives* **105** (6), 564-565.

HAASE, P., SCHLINK, U., RICHTER, M., 2002: Critical reconsideration of phase space embedding and non-parametric prediction of ozone time series. *Water Air and Soil pollution – Focus* **2** (5/6), 513-524.

HERBARTH, O., SCHLINK, U., MÜLLER, A., RICHTER, M., 2003: Spatiotemporal distribution of airborne mould spores in apartments. *Mycological Research* **107** (11), 1361-1371.

KANTZ, H., SCHREIBER, T., 2000: Nonlinear time series analysis. *Cambridge University Press,* Cambridge.

KOCAK, K., SAYLAN, L., SEN, O., 2000: Nonlinear time series prediction of O_3 concentration in Istanbul. *Atmospheric Environment* **34**, 1267-1271.

LAHL. U., STEVEN, W., 2005: Feinstaub – eine gesundheitspolitische Herausforderung. *Pneumologie* **59**, 704-714.

POPE III, C.A., DOCKERY, D.W., 2006: Critical Review: Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* **56**, 709-742.

POPPE, D., ZIMMERMANN, J., 2000: Chemische Ozonbildung in der planetarischen Grenzschicht, *Promet* **26** (3/4), 90-96.

REHWAGEN, M., SCHLINK, U., HERBARTH, O., 2003: Seasonal cycle of VOCs in apartments. *Indoor Air* **13**, 283-291.

SCHLINK, U., PETRESCU, C., STEINERT, C., SUCIU, O., RICHTER, M., IONOVICI, R., HERBARTH, O., 2007: Environmental health in port and harbour areas: air humidity modifying respiratory health in Drobeta Turnu Severin, Romania. In: Managing Critical Infrastructure Risks, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Limkov I, Wenning RJ, Kiker GA (Eds.), Oct 1997, *Springer.*

SCHLINK, U., HERBARTH, O., RICHTER, M., DORLING, S., NUNNARI, G., CAWLEY, G., PELIKAN, E., 2006: Statistical models to assess the health effects and forecast ground level ozone. *Environmental Modelling & Software* **21**, 547-558.

SCHLINK, U., REHWAGEN, M., DAMM, M., RICHTER, M., BORTE, M., HERBARTH, O., 2004: Seasonal cycle of indoor-VOCs: comparison of apartments and cities. *Atmospheric Environment* **38**, 1181-1190.

SCHLINK, U., DORLING, S., PELIKAN, E., NUNNARI, G., CAWLEY, G., JUNNINEN, H., GREIG, A., FOXALL, R., EBEN, K., CHATTERTON, T., VONDRACEK, J., RICHTER, M., DOSTAL, M., BERTUCCO, L., KOLEHMAINEN, M., DOYLE, M., 2003: A Rigorous Intercomparison of Ground-level Ozone Predictions. *Atmospheric Environment* **37**, 3237-3253.

SCHLINK, U., FRITZ, G.J., HERBARTH, O., RICHTER, M., 2002: Longitudinal modelling of respiratory symptoms in children. *International Journal of Biometeorology* **47**, 35-48.

SCHLINK, U., 2002: On the probability model for asthma attacks. *Journal of Theoretical Biology* **215**, 405-414.

SCHLINK, U., HERBARTH, O., RICHTER, M., REHWAGEN, M., PULIAFITO, J.L, PULIAFITO, E., PULIAFITO, C., GUERREIRO, P., QUERO, J.L., BEHLER, J.C., 1999: Ozone-monitoring in Mendoza, Argentina: initial results. *Journal of the Air & Waste Management Association* **49**, 82-87.

STÖLZEL, M., BREITNER, S., CYRYS, J., PITZ, M., WÖLKE, G., KREYLING, W., HEINRICH, J., WICHMANN, H.-E., PETERS, A., 2006: Daily mortality and particulate matter in different size classes in Erfurt, *Germany. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* (advance online publication, 15 November 2006), doi: 10.1038/sj.jes.7500538.

TANG, I.N., MUNKELWITZ, H.R., 1993: Composition and temperature dependence of the deliquescence properties of hygroscopic aerosols. *Atmospheric Environment* **27** (A/4), 467-473.

TUCH, T.M., HERBARTH, O., FRANCK, U., PETERS, A., WEHNER, B., WIEDENSOHLER, A., HEINTZENBERG, J., 2006: Weak correlation of ultrafine aerosol particle concentrations <800 nm between two sites within one city. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* **16**, 486–491.
UBA,2006: http://www.env-it.de/luftdaten/documents.fwd?comp=NO_2#NO_2.

UBA, 2006: Hintergrundpapier - Die Nebenwirkungen der Behaglichkeit: Feinstaub aus Kamin und Holzofen. *Umweltbundesamt*, Dessau. Siehe auch Pressemitteilung des UBA: http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2006/pd06-013.htm.

VDI und DIN Arbeitsgruppe, 2003: Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zur gesundheitlichen Wirkung von Partikeln in der Luft. Arbeitsgruppe „Wirkungen von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit" der *Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN*, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

VDI 2119 Blatt 4, 1997: Messung partikelförmiger Niederschläge – Mikroskopische Unterscheidung und größenfraktionierte Bestimmung der Partikeldeposition auf Haftfolien – Probenahmegerät Sigma-2. *Beuth Verlag*, Berlin.

VDI 3787, Blatt 10 Entwurf, 2006: Umweltmeteorologie – Anforderungen an die atmosphärischen Umweltbedingungen im Bereich der Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation. *Beuth Verlag*, Berlin.

WHITTEMORE, A.S. KELLER, J.B., 1979: Asthma and air pollution: a quantitative theory. In: Breslow N.E., Whittemore A.S. (Hrsg.), *Energy and Health*, 137.

WHO (World Health Organization), 2004: Health aspects of air pollution, Kopenhagen.

WILSON, A.M., SALLOWAY, J.C., WAKE, C.P., KELLY, T., 2004: Air pollution and the demand for hospital services: a review. *Environment International* **30**, 1109-1118.

H. BEHRENDT, K.-C. BERGMANN, H. BURKHARDT, J. RING, E. SCHULTZ, B. VOGEL, H. VOGEL

4 Allergene Pollen

Allergic Pollen

Zusammenfassung
Etwa 10 % der Bevölkerung in Deutschland leiden unter einer Pollenallergie. Die Pollen von Haselnuss, Erle, Birke, Süßgräser, Roggen und Beifuß gelten als allergene Pollen. Insbesondere Dieselrußpartikel und flüchtige organische Verbindungen können die Allergieentstehung fördern und eine bestehende Allergie verstärken. An etwa 50 Stationen in Deutschland wird deren Konzentration mikroskopisch bestimmt. Die Pollenflugvorhersage des DWD basiert auf den dort ermittelten Tagesmittelwerten. Im Rahmen eines BMBF-Vorhabens wurde ein mikroskopbasierter automatischer Pollenmonitor entwickelt, der in einem Messnetz ab 2008 stündliche Pollendaten liefern soll. Die Pollenerkennungssoftware erreicht Erkennungsraten von über 90 %. Die Daten sollen zur aktuellen Information der Allergiker und für ein Pollenflugvorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes eingesetzt werden.

Abstract
About 10 % of the population in Germany suffers from pollen allergies. The pollen of hazel, alder, birch, grass, rye and mugwort are recognised as the species of most allergic importance. Diesel soot particles and volatile organic compounds are able to promote allergy und elicite the allergic response in sensitized individuals. The concentration of these pollen types is microscopically determined at about 45 sites in Germany. The pollen forecast of the DWD is based on the daily averages derived from these measurement. A microscope-based automatic pollen monitor was developed within a project funded by the German research minister. A pollen network is planned to provide hourly data from 2008 on. The pollen recognition software did achieve recognition rates of more than 90 %. The data will be used for a current information of allergy suffers and for an operational pollen forecast model of the DWD.

1 Die Messung der Pollen – heute und morgen

1.1 Bedarf

Nach einer repräsentativen Erhebung aus dem Jahre 1999 leiden 17 % der Ostdeutschen und 23 % der Westdeutschen unter einer Allergie. Knapp die Hälfte gab an, unter einer Pollen-Allergie zu leiden (DGAI 2000). Die Betroffenen sind gegen die verschiedenen Pollenarten unterschiedlich sensibilisiert. Die Sensibilisierung tritt oft schon im Kindesalter ein und erreicht regional unterschiedlich mit 8 bis 21 % die höchsten Werte für Graspollen, gefolgt von den Birkenpollen mit 5 bis 8 % (DGAI 2000). Den verschiedenen Pollenarten wird aus diesem Grunde ein unterschiedliches Belastungsrisiko zugeordnet. Ein besonderes Belastungsrisiko scheint nach neuesten Untersuchungen von Pollen auszugehen, die erhöhten Konzentrationen anthropogener Spurenstoffe ausgesetzt sind. Über das Belastungspotenzial der Pollen auch unter diesem Aspekt gibt Kapitel 2 dieses Beitrages (Autoren H. Behrendt und J. Ring) Auskunft.

1.2 Pollenflug

Die Pollenkonzentration kann räumlich und zeitlich erheblich variieren. Dieser Umstand kann von den Pollenallergikern dazu genutzt werden, erhöhten Pollenkonzentrationen durch Anpassung der Lebensgewohnheiten und Planung von Freizeitaktivitäten auszuweichen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Pollenflugsituation für den Aufenthaltsort möglichst aktuell bekannt ist. In vielen Ländern, so auch in Deutschland, wurden aus diesem Grunde Polleninformationsdienste eingerichtet, die Pollenmessungen durchführen und die Messdaten für eine Pollenflugvorhersage nutzen bzw. zur Verfügung stellen. In Deutschland werden die bundesweiten Messungen von der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst an etwa 50 Messstellen durchgeführt. Die langjährigen Messungen liefern neben dem aktuellen Bezug auch interessante Informationen über die Verbreitung, saisonale Schwankungen und das Auftreten von Neophyten als Folge der Klimaänderung (Beispiel Traubenkraut, amerikanisch Ragweed, *Ambrosia Artemisiifolia*). Kapitel 3 (Autor K.-C. Bergmann) dieses Beitrages beinhaltet Informationen über das Messnetz der Stiftung und die medizinische Bedeutung dieser Daten. Der Deutsche Wetterdienst erstellt auf dieser Grundlage eine tägliche Pollenflugvorhersage.

1.3 Eigenschaften

Pollen sind Bestandteil des atmosphärischen Grobaerosols. Die Verbreitung der häufigsten, allergologisch relevanten Pollen erfolgt durch den Wind. Im feuchten, aufgequollenen Zustand liegt ihre Größe

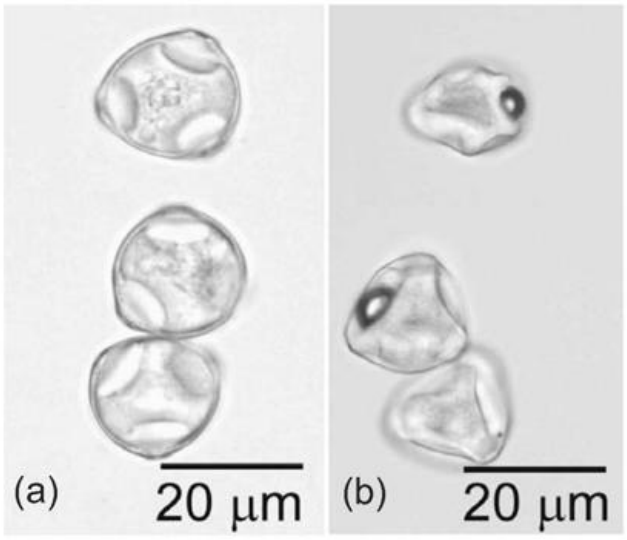


Abb. 4-1: Haselpollen, (a) frisch / wässrig eingebettet, (b) gealtert, luftgetragen.

zwischen 20 (z. B. Hasel) und etwa 60 µm (Roggen) geometrischer Durchmesser (Abb. 4-1). Noch kleinere Pollen mit einem geometrischen Durchmesser von etwa 10 µm produziert die Brennnessel, während die Pollen der Koniferen Größen von 80 bis 100 µm erreichen. Durch Austrocknung und Alterung des Pollenkorns kann die Größe (projizierter Durchmesser) um 10 bis zu 50 % abnehmen und zusätzlich durch die Schrumpfung von der typisch isometrischen Form stark abweichen (PAYNE 1972). Damit einhergehende Änderungen der aerodynamischen Eigenschaften haben einen Einfluss auf die atmosphärische Aufenthaltsdauer und damit auf die Pollenausbreitung (FERNANDEZ-SEVILLA 2006).

Die Pollenkonzentration weist neben einem typischen Jahresgang auch einen artspezifischen Tagesgang auf, der überwiegend von den meteorologischen Randbedingungen beeinflusst wird. Bei den anemophilen Baumarten erfolgt die Pollenfreisetzung bevorzugt bei geringer relativer Feuchte in den Nachmittagsstunden, bei den Gräsern dagegen eher unter den feuchteren Bedingungen am Morgen (PULS 1987).

Die Anzahlkonzentration erreicht in Abhängigkeit von der Blühphase der jeweiligen Pflanzen auch an quellfernen Standorten bis zu 10^3 Pollen/m³ und kann auf Werte von mehreren Tausend Pollen pro m³ in unmittelbarer Nähe entsprechender Pflanzenbestände ansteigen. Die Pollenproduktion eines Baumes wird häufig in Abhängigkeit vom Kronendurchmesser angegeben. Für die Esche werden in der Literatur Werte von 20 bis $200 \cdot 10^9$ Pollenkörner pro Meter Kronendurchmesser angegeben (HELBIG et al. 2004). Die Pollenproduktion einer Baumspezies kann von Jahr zu Jahr um den Faktor 10 und mehr schwanken. Als Ursache werden biologische Rhythmen der Blütenbildung angenommen.

1.4 Sammelverfahren

Die Erfassung dieses biologischen Grobaerosols mit saisonal und tageszeitlich stark wechselnden Konzentrationen stellt an entsprechende Sammelgeräte besondere Anforderungen. Außerdem verlangt die mikroskopische Untersuchung und Unterscheidung der Pollen die Abscheidung auf einer mikroskopierfähigen Unterlage. Die Proben müssen für eine hochauflösende Lichtmikroskopie geeignet sein.

Als Sammelgerät wird in Deutschland und zahlreichen anderen Ländern die Pollenfalle nach Burkard eingesetzt (Abb. 4-2). Bei der Pollenfalle handelt es sich um einen einstufigen Schlitzimpaktor. Der Ansaugkopf wird durch eine Windfahne in Windrichtung gehalten. Die Probenahme erfolgt durch Ansaugen der Außenluft (6 m³/h) und Abscheidung auf einem kontinuierlich bewegten (2 mm/h) Klebestreifen mit der Möglichkeit einer zeitlich aufgelösten Auswertung. Dieser Vorteil wird jedoch in der Regel nicht genutzt, da die Augenauswertung zu aufwendig ist.

In den USA und Kanada wird noch der sogenannte Rotorod-Sammler verwendet. Der Sammler hat die Eigenschaft eines Freiflügelimpaktors. Die Pollen werden auf zwei kleberbeschichteten Objektträgern abgeschieden, die an den Enden eines rotierenden Stabes mit einer definierten Geschwindigkeit durch die Außenluft bewegt werden. Eine detaillierte Beschreibung beider Verfahren geben SCHARRING et al. (2006). Die Auswertung der Proben erfolgt in beiden Fällen mit dem Auge unter dem Mikroskop.

Die mikroskopische Auswertung mit einem Durchlichtmikroskop bei 40-facher Objektivvergrößerung erfordert gut geschultes und erfahrenes Personal. Der Zeitaufwand beträgt bei mittlerer Belegung etwa 2 Stunden pro Probe. Die Qualität der Augenauswertung schwankt dennoch deutlich in Abhängigkeit vom Zustand und Belegung der Proben. Einen erheblichen Einfluss auf die Datenqualität hat außerdem die Motivation und der Ausbildungsstand des Personals. Einen Nachteil bedeutet schließlich auch die Tatsache, dass

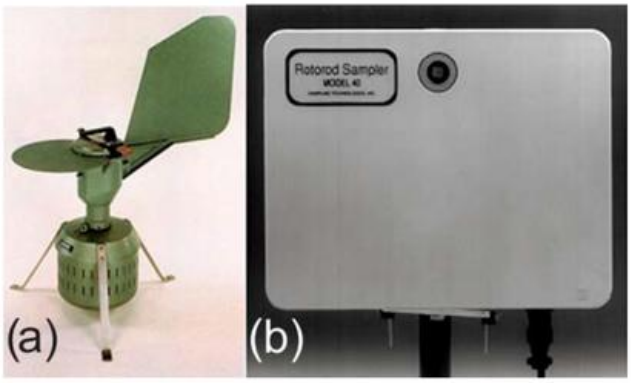


Abb. 4-2: Pollensammler, (a) Pollenfalle nach Burkard, (b) Rotorod-Sammler.

die Daten erst nach Ende der täglichen Messung (8 Uhr Vortag bis 8 Uhr) vorliegen und nur eine durchschnittliche Pollenbelastung für diesen Zeitraum liefern.

1.5 Automatische Auswertung

Mit Entwicklung der digitalen Bildverarbeitung in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts begannen daher auch die ersten Versuche, die Auswertung zu automatisieren. Ziel war es, zeitnah reproduzierbare Pollendaten bekannter Qualität bereit zu stellen. Bis Ende der 90er Jahre führten diese Versuche jedoch aufgrund einer mangelnden Erkennungsleistung zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Die automatische Erkennung gelang zwar zufriedenstellend an ausgewählten Proben, die nur die interessierenden Pollen enthielten. Die Erkennung versagte jedoch spätestens bei dicht belegten Luftstaubproben, in denen die Pollen vermischt mit anderen atmosphärischen Staubpartikeln vorliegen. Eine besondere Herausforderung für die automatische Erkennung bedeutet die Kontamination der Pollen durch feinere Staubpartikel. Die Erkennungsleistung blieb aus diesen Gründen unter 70 %.

Erst durch Beschränkung der Probenahme auf Partikel > 10 µm aerodynamischer Durchmesser, eine verbesserte Präparation der Proben und den Einsatz der Fluoreszenzmikroskopie gelang es, Bilder zu erzeugen, die für eine automatische Erkennung wesentlich bessere Voraussetzungen besaßen. Den entscheidenden Fortschritt für die automatische Erkennung bedeutete schließlich die Verwendung von 3D-Bildinformationen sowie die Extraktion so genannter Grauwert-Invarianten. Zur Klassifikation der Pollen mit Hilfe der Grauwertinvarianten wurde ein lernfähiger Klassifikator in Form so genannter **S**upport-**V**ektor-**M**aschinen (SVM) eingesetzt, der keine pollenspezifischen Erkennungsmerkmale benutzt, sondern diese anhand einer Lerndatenbank selbst ableitet. An realen Luftstaubproben führte dieser Ansatz zu Erkennungsleistungen von über 90 %. Details sind im Kapitel 4 dieses Beitrages (Autor H. Burkhardt) beschrieben.

1.6 Der Pollenmonitor

In einem vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben gelang auf dieser Basis die Entwicklung eines kontinuierlich arbeitenden, mikroskopbasierten Pollenmonitors (Abb. 4-3). An dem Projekt war neben dem DWD der Lehrstuhl für Mustererkennung und Bildverarbeitung der Universität Freiburg, das Fraunhofer **I**nstitut für **P**hysikalische **M**esstechnik (IPM) ebenfalls in Freiburg und das Fraunhofer **I**nstitut für **T**oxikolo-

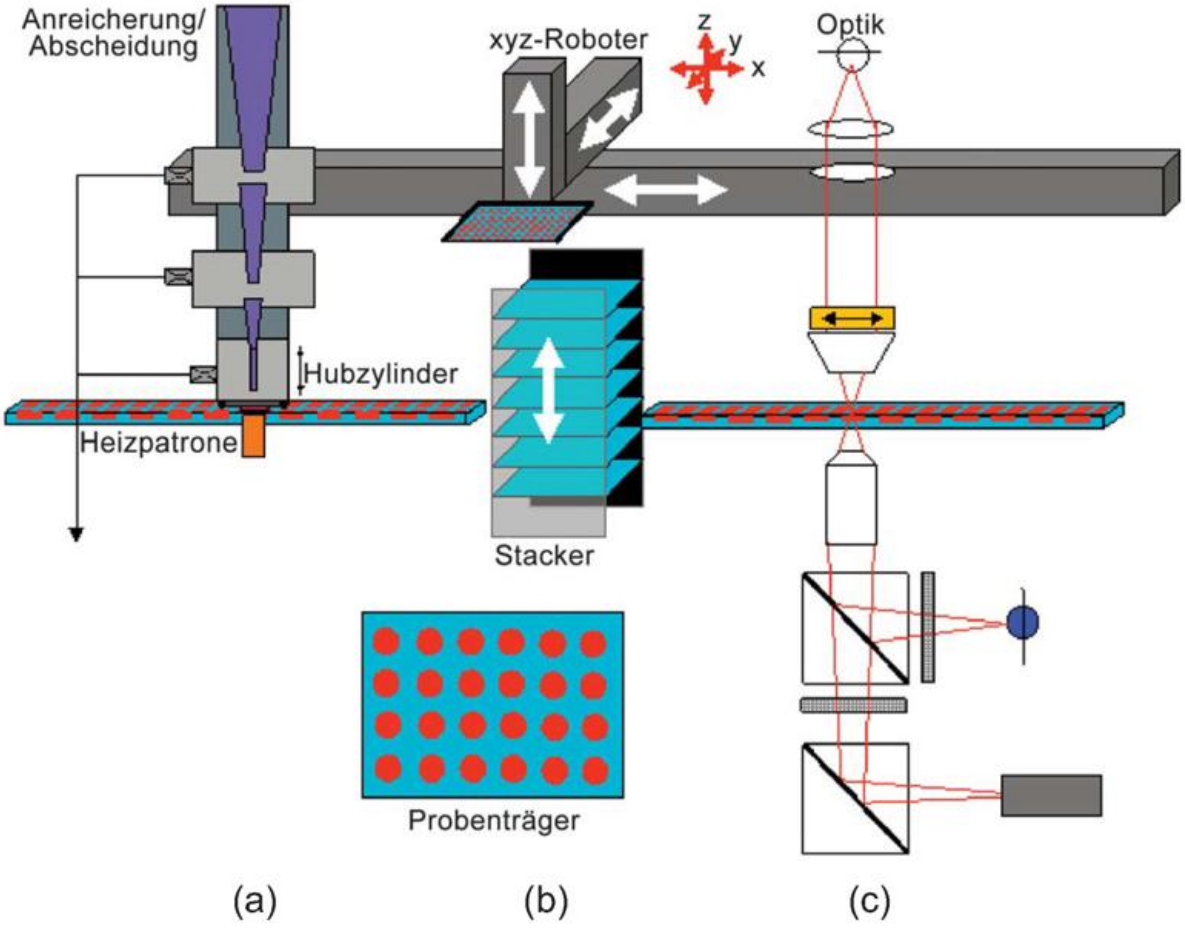


Abb. 4-3: Pollenmonitor, schematische Darstellung der Systemkomponenten, (a) Sammeleinheit, (b) Probenführung, (c) Optikmodul.

gie und **E**xperimentelle **M**edizin (ITEM) in Hannover sowie zwei Industriepartner beteiligt. Der automatische Pollenmonitor ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Probenahme:
  - Ungerichteter Lufteinlass (Ringschlitz, 70 m³/h)
  - Größenselektive Probenahme 10 - 80 µm (zwei stufiger Virtualimpaktor)
  - Schonende Abscheidung (Anströmgeschwindigkeit 0,12 m³/h)
  - Berührungslose Präparation (thermische Glyceringelatine-Einbettung)
- Bilderzeugung:
  - xyz-Probenführung (24 Proben pro Tag, 7 Tage pro Woche)
  - LED-Beleuchtung: 533 nm (Durchlicht), 380 nm (Fluoreszenz)
  - Abbildungsverfahren: Durchlicht-Hellfeld, Durchlicht-Dunkelfeld, Fluoreszenz
  - Bildstapeleinzug (40 Ebenen pro Gesichtsfeld)
- Bildverarbeitung:
  - Segmentierung (Selektion interessierender Objekte aus 3D-Bilddaten)
  - Grauwert-Invarianten (Extraktion eines „Mathematischen Fingerabdrucks")
  - Trainingsdatenbank (Merkmalsraum vom Menschen indizierter Objekte)
  - Klassifikation (Automatische Zuordnung durch lernfähigen Klassifikator)

In einem Anschlussvorhaben soll der existierende Prototyp zu einem kontinuierlich arbeitenden, feldtauglichen System weiter entwickelt werden. Ab 2008 ist geplant, die ersten Geräte in den Messnetzen der nationalen Wetterdienste Dänemarks (DMI), der Schweiz (MeteoSchweiz) und Deutschlands (DWD) einzusetzen.

Das Ziel ist es dabei, stündliche Konzentrationsdaten für die allergologisch relevanten Pollenarten bereitzustellen. Diese Daten sollen der Öffentlichkeit zeitnah als Information über die aktuelle Pollenflugsituation zur Verfügung stehen und als Eingangsdaten für eine objektive Pollenflugvorhersage dienen. Die Entwicklung eines Pollenausbreitungsmodul für das COSMO-EU (früher: LME) des DWD als Grundlage für eine objektive Pollenflugvorhersage wird in Kapitel 5 dieses Beitrages (Autoren H. und B. Vogel) beschrieben.

2 Wirkungsweise allergener Pollen und Einfluss von Umweltfaktoren

2.1 Allergien und allergische Erkrankungen

Allergien haben in den letzten Jahrzehnten weltweit an Häufigkeit zugenommen; dabei sind es vor allen Dingen die so genannten atopischen Erkrankungen (allergisches Asthma bronchiale 5 – 10 %, allergische Rhinokonjunktivitis, i. e. Heuschnupfen 10 – 20 %, atopisches Ekzem = Neurodermitis 5–10 %), die die stärksten Anstiegsraten gezeigt haben (HOLGATE et al. 2006). Die Ursachen für den dramatischen Anstieg der Allergieprävalenz sind letztlich nicht bekannt; es gibt jedoch verschiedene Hypothesen, wobei die Einflüsse von Umweltfaktoren in den letzten Jahren besonders diskutiert wurden (Abb. 4-4) (BEHRENDT et al. 1999).

Unter Allergie versteht man eine „spezifische Änderung der Immunitätslage im Sinne einer krankmachenden Überempfindlichkeit" (RING 2004). Allergische Erkrankungen umfassen so verschiedene Zustandsbilder wie Heuschnupfen, Urtikaria (Nesselsucht), anaphylaktischer Schock, Serumkrankheit, Kontaktdermatitis, allergisches Asthma, atopisches Ekzem sowie das bunte Spektrum der Nahrungsmittel- und der Arzneimittelallergien.

Allergien können sich an nahezu allen Organen manifestieren, am häufigsten sind jedoch Haut und Schleimhäute betroffen, eben jene Grenzflächen, an denen sich die Auseinandersetzung des Organismus mit seiner Umwelt unmittelbar abspielt. Allergische Erkrankungen entstehen durch fehlgeleitete Immunreaktionen, wobei unterschiedliche Typen hinsichtlich ihres Pathomechanismus unterschieden werden. Am häufigsten sind Allergien vom Typ I, sogenannte Soforttyp-Allergien, welche über **Immun**globulin **E**-Antikörper vermittelt werden, deren Bildung die Folge einer T-Helfer-2-dominierten Immunreaktion ist. Bei den IgE-vermittelten Allergien kommt es nämlich im Verlauf der Reifung von T-Lymphozyten zu einer Subpopulation von Th_2-Zellen, welche sich durch die Bildung von Zytokinen wie Interleukin 4, Interleukin 5 und Interleukin 13 auszeichnen.

Die allergenspezifischen IgE-Moleküle binden schließlich an hochaffine Rezeptoren von Mastzellen und basophilen Granulozyten. Nach erneutem Kontakt mit dem Allergen werden die Zellen aktiviert, sie degranulieren und setzen Botenstoffe frei, die dann zur Auslösung der allergischen Symptome führen, z. B. zu Niesattacken, einem akuten Asthmaanfall oder ei-

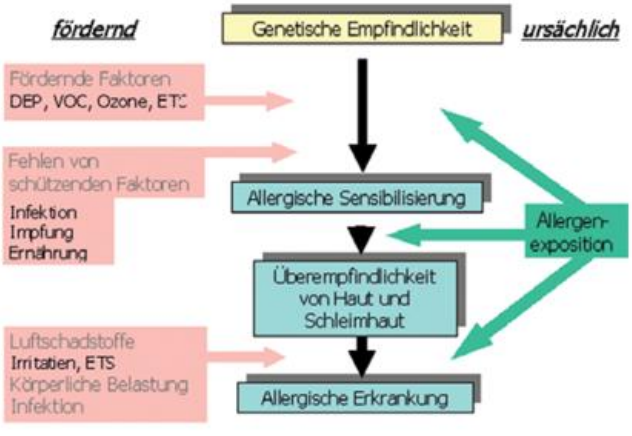


Abb. 4-4: Determinanten der allergischen Entzündung.

ner Ekzem-Verschlimmerung, der Neurodermitis. Während die Vorgänge bei der Auslösung einer allergischen Reaktion im bereits sensibilisierten Organismus (d. h. IgE-Antikörper sind vorhanden) mit der Aktivierung und Degranulierung von Mastzellen unter Freisetzung von vasoaktiven Bodenstoffen (wie z. B. Histamin, Leukotriene) relativ gut beschrieben sind, sind die Mechanismen in der Entstehung einer allergischen Reaktion, d. h. am Beginn der Sensibilisierung, noch weniger gut bekannt (HOLGATE et al. 2006).

2.2 Allergene

Allergene sind Antigene, die eine Allergie hervorrufen können. Dabei handelt es sich meist um Proteine pflanzlichen oder tierischen Ursprungs, die über verschiedene Kontaktwege (z. B. durch die Luft als Aeroallergene, oder über die Nahrung als Nahrungsmittelallergene) mit dem menschlichen Immunsystem in Kontakt treten. Trotz großer Fortschritte in der Erkennung der molekularen Natur vieler Allergene wissen wir bislang nicht, was einen Stoff zum „Allergen" prädestiniert. Der Ausdruck „allergene Potenz" beschreibt sowohl die Häufigkeit der Sensibilisierung, die Intensität der Sensibilisierung, die Geschwindigkeit der Sensibilisierung, die Häufigkeit und Intensität der allergischen Erkrankung sowie die Geschwindigkeit der Allergieauslösung, und ist deshalb relativ unscharf definiert.

Viele Allergene sind bereits rekombinant verfügbar. Zur Nomenklatur werden die ersten drei Buchstaben der Gattung (Genus) nach einem Zwischenraum gefolgt vom ersten Buchstaben der Art (Spezies) und nach einem Zwischenraum einer arabischen Ziffer verwendet. Beispiel: erst beschriebenes Allergen der Warzenbirke (**Bet**ula **v**errucosa = Bet v 1).

Die wichtigsten Aeroallergene in der Außenluft kommen aus pflanzlichen Pollen oder Schimmelpilzsporen. Dabei besteht zwischen den Pollen verschiedener Gattungen und Arten, aber auch darüber hinaus häufig eine Antigengemeinschaft, die zu Kreuz-Reaktionen in der IgE-Antwort führt. Die Kenntnis dieser Kreuz-Sensibilisierungen ist für die Diagnostik und Therapie wichtig, da sie sich auch auf Nahrungsmittelallergene erstreckt. Man spricht dann von Pollen-assoziierten Nahrungsmittelallergien (BEHRENDT et al. 1999).

Der Pollen ist der Träger des männlichen Erbguts bei höheren Pflanzen (Gametophyt). Pollenkörner besitzen eine widerstandsfähige Hülle aus zwei Schichten, der inneren „Intine" aus Zellulose und Pektin und der dieser aufgelagerten Exine aus Carotinoid-Komplexen. Die Doppelhülle umschließt das Zytoplasma des Pollens mit dem Zellkern. Die allergenen Substanzen stammen meist aus dem Zytoplasma, finden sich aber auch in der Intine, gelegentlich auch in der Exine. Sie werden freigesetzt, sobald unter der die Keimung vor-

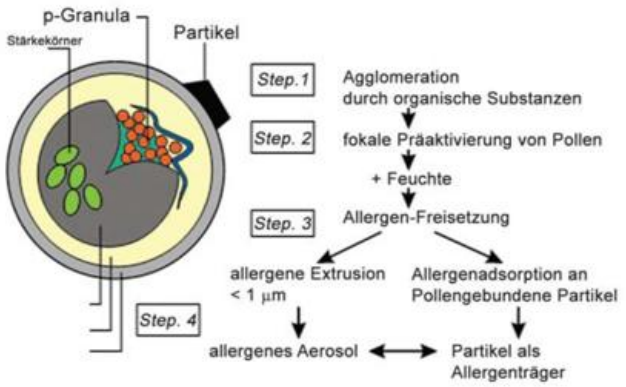


Abb. 4-5: Bildung eines pollenfreien, allergenhaltigen Aerosols aus BEHRENDT and BECKER, (2001).

bereitenden Quellung im feuchten Milieu Enzymproteine durch die doppelte Wandschicht nach außen diffundieren (Abb. 4-5). Erst diese Bioverfügbarkeit von Allergen führt dann beim betroffenen Menschen zu Symptomen.

Neben den Allergenen setzen Pollenkörner unter Feuchtbedingungen noch weitere biologisch aktive Stoffe aus der Gruppe der Lipide, die sog. „**P**ollen-**A**ssoziierten **L**ipid-**M**ediatoren, die PALMs, frei (TRAIDL-HOFFMANN et al. 2005). Diese PALMs umfassen einerseits proinflammatorisch wirkende Eikosanoid-artige Stoffe mit Leukotrien-Wirkung, welche Entzündungszellen wie neutrophile und eosinophile Granulozyten anziehen und aktivieren. Die immunmodulatorischen PALMs, aus der Gruppe der Prostaglandin-ähnlichen Phytoprostane wirken direkt auf antigenpräsentierende, dendritische Zellen und stellen ein Allergie-förderndes Milieu, ein Th_2-Milieu her (TRAIDL-HOFFMANN et al. 2005).

2.3 Einfluss von Umweltfaktoren auf die allergische Immunantwort

Es ist inzwischen gut belegt, dass anthropogene (und biogene) Umweltfaktoren eine IgE vermittelte Allergie fördern können und bei Allergikern eine Verstärkung ihrer Symptome hervorrufen können. Zu diesen anthropogenen Stoffen gehören in erster Linie partikuläre Luftschadstoffe, insbesondere Dieselrusspartikel und städtisches Umweltaerosol sowie Tabakrauch, aber auch flüchtige organische Komponenten und Ozon (siehe Abb. 4-4). Diese Wirkung können sie aber nur in Kombination mit dem kausalen Agens der Allergie, dem Allergen, entfalten.

Im Hinblick auf die Aeroallergene, insbesondere aus Pollen, ist zu berücksichtigen, dass diese bereits in einer durch Luftschadstoffe belasteten Atmosphäre verändert werden. Über westdeutschen Großstädten finden sich Agglomerationen von Luftschadstoffpartikeln auf Pollenoberflächen. Die in vitro-Belastung von Pollen mit Schadstoffpartikeln verändert deren Oberflä-

chenstruktur, erhöht den Allergenausstrom und führt zur Bildung eines pollenfreien, aber allergenhaltigen Aerosols (BEHRENDT und BECKER 2001, Abb. 4-5). Dies bewirken insbesondere Luftschadstoffe wie sie für starke Verkehrsbelastung typisch sind. So konnte gezeigt werden, dass bestimmte Allergene des Graspollens quantitativ an Dieselrusspartikel binden und damit ein zweites allergenhaltiges Kompartiment in der Partikelfraktion $PM_{2,5}$ und kleiner entsteht.

Auch die Sekretion von entzündungsfördernden PALMs wird durch Umweltschadstoffe moduliert: so fanden sich nicht nur deutliche Verstärkungen der PALMs-Sekretion nach Vorbelastung der Pollenkörner mit flüchtigen organischen Substanzen (BEHRENDT und BECKER 2001), sondern auch erhöhte Werte, wenn die Pollen von Pflanzen gesammelt wurden, die nah an verkehrsreichen Straßen gewachsen waren.

2.4 Schlussfolgerungen

Klinische, epidemiologische und experimentelle Untersuchungen haben zweifelsfrei ergeben, dass von der genetischen Prädisposition auf dem Weg über die allergische Sensibilisierung und die Entwicklung einer Überempfindlichkeit von Haut und Atemwegen bis hin zur tatsächlichen Manifestation der allergischen Krankheit Umweltfaktoren eine entscheidende Rolle spielen. Dabei muss zwischen verursachenden Umweltstoffen, d. h. Allergene und Allergie-modulierenden/fördernden Faktoren, z. B. Umweltschadstoffe unterschieden werden.

3. Auftreten und Verbreitung von allergenen Pollen in Deutschland

3.1 Allergie-relevante Pollen

In Deutschland werden die Pollen von sechs Pflanzen als „allergie-relevant" angesehen und als „Basispollen" durch das Messnetz der Stiftung Deutscher **P**olleninformations**d**ienst (PID) erfasst, ihr Vorkommen quantitativ dokumentiert. Es handelt sich um Pollen von Haselnuss (*Corylus*), Erle (*Alnus*), Birke (*Betula*), Süssgräsern (*Gramineae*), Roggen (*Secale*) und Beifuß (*Artemisia*).

Die Bezeichnung „allergie-relevant" drückt aus, dass diese Pollen über Allergene verfügen, die nach dem Kontakt mit dem menschlichen Körper zur Bildung spezifischer IgE-Antikörper und damit zu einer Sensibilisierung führen. Eine Sensibilisierung ist nachzuweisen durch einen positiven Hauttest (in der Regel als Prick-Test) mit dem Allergen oder durch den Nachweis des IgE-Antikörpers im Serum mittels empfindlichen Nachweissystemen, meist als so genannte „RAST".

Je mehr Menschen durch die nasale oder bronchiale Inhalation einer Pollenart sensibilisiert werden, umso

Pollenart bzw. -gruppe	0 keine	1 schwach	2 mäßig	3 stark
Hasel	0	1-10	11-100	> 100
Erle	0	1-10	11-100	> 100
Birke	0	1-10	11-50	> 50
Gräser	0	1-5	6-30	> 30
Roggen	0	1-2	3-6	> 6
Beifuß	0	1-2	3-6	> 6

Tab. 4-1: Pollenflugklassen wichtiger Pollenarten in der Luft, die regelmäßig von den Messstationen erfasst werden. Bewertung der Immisionskonzentrationen von einzelnen Pollenarten oder -gruppen hinsichtlich ihres im Mittel zu erwartenden Belastungsrisikos für Pollenallergiker.

mehr spricht man von einer allergenen Relevanz dieser Pollen. Werden nur in Ausnahmefällen Menschen durch den Kontakt mit Pollen sensibilisiert, z. B. durch die Pollen von Schilf, so misst man ihnen eine nur geringe oder keine allergene Relevanz zu; mit der Folge, dass ihr Auftreten in der Luft nicht regelhaft durch die Pollenmessstationen in Deutschland und Europa erfasst werden.

Es ist wichtig zu wissen, dass eine Sensibilisierung, d. h. das Auftreten von IgE-Antikörpern noch nicht bedeutet, dass die Person auch erkrankt ist, d. h. eine Allergie in Form von Heuschnupfen oder allergischen Asthma hat. Viele Menschen bilden zwar nach dem Kontakt mit Pollen Antikörper, sind also sensibilisiert, erkranken aber nicht. Diesen Zustand nennt man eine „klinisch stumme Sensibilisierung".

Neben den genannten sechs allergologisch relevanten Pollen (Tab. 4-1) werden die in der Tab. 4-2 aufgeführten Pollen optional erfasst. Neben diesem Versuch einer Definition „allergener Pollen" oder „allergie-relevanter Pollen", über die es bisher keine internationale Verständigung gibt, ist zu beachten, dass auch der Begriff „Allergenität von Pollen" nicht definiert ist.

3.2 Allergenität und Pollensaison

Mit dem Begriff „Allergenität" wird beschrieben, in welcher Stärke Allergene allgemein, bzw. hier Pollen, nicht nur zur Antikörperbildung führen, sondern auch allergische Krankheitssymptome von Erkrankungen wie Heuschnupfen oder allergischem Asthma auslösen.

Es gibt große Unterschiede hinsichtlich der Allergenität zwischen den allergenen Pollen. So besitzen die Pollen von Roggen und auch Beifuss eine höhere Allergenität als die Pollen von Gräsern und mehr noch von Birke und Hasel. Dies bedeutet, dass die Exposition mit einer relativ geringen Konzentration an Roggenpollen bereits zu klinischen Symptomen bei Personen mit einer allergischen Rhinitis durch Roggenpollen führt, während Haselnusspollen in weit höherer Konzentration auftreten müssen, um bei Haselnussallergikern eine juckende, fließende und niesende Nase auszulösen.

Baumpollen	Sonstige Pollen
Ahorn (*Acer*)	Ampfer (*Rumex*)
Eibe/Wacholder (*Taxus/Juniperus*)	Brennnesselkraut/Glaskraut (*Urtica/Parietaria*)
Eiche (*Quercus*)	Doldenblütengewächs (*Umbelliferae*)
Esche (*Fraxinus*)	Gänsefuß (*Chenopodium*)
Esskastanie (*Castanea*)	Heidekrautgewächse (*Ericacecae*)
Fichte (*Picea*)	Hopfen (*Humulus*)
Hainbuche (*Carpinus*)	Korbblütler (*Compositae*)
Kiefer (*Pinus*)	Kreuzblütengewächse (*Cruciferae*)
Lärche (*Larix*)	Traubenkraut (*Ambrosia*)
Linde (*Tilia*)	Wegerich (*Plantago*)
Pappel (*Populus*)	
Platane (*Platanus*)	
Roßkastanie (*Aesculus*)	
Rotbuche (*Fagus*)	
Ulme (*Ulmus*)	
Walnuß (*Juglans*)	
Weide (*Salix*)	

Tab. 4-2: Übersicht von in Deutschland auftretenden Pollen, die optional von Messstationen erfasst werden.

Diesem Sachverhalt einer unterschiedlichen Allergenität wird in praxi Rechnung getragen durch die vom PID angegebenen Belastungsrisiken bei bestimmten Pollenkonzentrationen im Rahmen der Pollenflugvorhersage (Tab. 4-1).

Dabei kann es sich nur um eine ganz grobe Einteilung handeln, denn die Stärke der klinischen Reaktion auf eine bestimmte Pollenkonzentration hängt von einer Reihe von Faktoren des betroffenen Individuums ab; so von der Stärke seiner Sensibilisierung und dem jeweiligen Grad der unspezifischen und allergenspezifischen nasalen, konjunktivalen und bronchialen Hyperreaktivität; diese wechseln in ihrer Stärke während der Pollensaison, sie sind vor der Pollensaison gering, haben zur Zeit bzw. kurz nach dem Höhepunkt des Pollenfluges ihr Maximum und fallen mit und ohne Medikation nach dem Ende der Pollensaison wieder ab.

Auch der Begriff der Pollensaison ist international nicht definiert. Aus klinisch-medizinischer Sicht definiert der PID den Beginn einer Pollensaison derart, dass an drei aufeinander folgenden Tagen oder an drei Tagen innerhalb einer Woche eine der Belastungsstufe „mäßig" zugeordnete Pollenkonzentration (der entsprechenden Pollenart) in 24 Stunden aufgetreten ist, z. B. für Birkenpollen 11 Pollen pro m^3 Luft.

3.3 Erfassung der Pollenkonzentration und Pollenflugvorhersage

Die Erfassung von luftgetragenen Pollen begann in Deutschland mit einem Feldversuch im Mai 1981 in Nordrhein-Westfalen mit drei Pollenfallen in Bad Lippspringe, Bonn und Moers, die Gräser- und Roggenpollen erfassten. Die Versuche einer Pollenflugvorhersage für die nächsten zwei bis vier Tage waren erfolgreich; ein Vergleich zwischen Pollenkonzentrationen und dem Beschwerdegrad von Patienten, die ein Tagebuch über ihre Symptome an Nase, Augen und Bronchien führten, unterstrich die Güte der Pollenflugvorhersage. Auf dieser Grundlage wurde 1983 die Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst gegründet. Die Stiftung plant, organisiert und prüft die Messung des Pollenfluges an etwa 45 „normalen Messstellen", die mit Beginn des Pollenfluges meist im März der Jahre ihre Arbeit aufnehmen und bis August montags, mittwochs und freitags an den DWD und den PID die erfassten Pollenkonzentrationen mitteilen. Der Aufbau von „Referenzmessstellen" (n = 7 im September 2006), die ganzjährig messen, ermöglicht es, auch den Blühbeginn der früh blühenden Pollen von Hasel und Erle zu erfassen und späte herbstliche Konzentrationen von Beifuß- oder Ambrosiapollen. Referenzmessstellen unterliegen obligatorisch einer Qualitätskontrolle.

Die Erfassung von Pollen erfolgt in Deutschland ausschließlich mit Burkard-Pollenfallen. Die Aufstellung und Benutzung der Fallen einschließlich der Pollenanalyse sollte die vom PID publizierten Empfehlungen beachten. Für die Standorte der Fallen wurden Flachdächer in 5 bis 15 m Höhe empfohlen, um mit der Falle nicht nur die Pollen der Flora der unmittelbaren Umgebung aufzufangen, sondern auch den wichtigen Ferntransport von Pollen (z. B. Erfassung von Ambrosiapollen aus der Ukraine in Stockholm 2002) zu berücksichtigen.

3.4 Schwankungen der Pollenkonzentration

Der Pollenflug ist von meteorologischen Faktoren wie Sonnenscheindauer, Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit, Niederschlagsmenge und -dauer sowie elektrostatischer Aufladung der Luft abhängig. Er hat daher tages- und jahreszeitlich typische Verläufe.

Der Tagesgang der Pollenkonzentrationen bei überwiegend trockenem Wetter wurde von SCHEID und BERGMANN (2004) wie folgt beschrieben: Die Pollen von Hasel und Erle haben ihr Maximum am Nachmittag, die Birke gegen Mittag, die Gräser und Roggen bereits am Vormittag zwischen 6 und 9 Uhr und Beifuss zwischen 8 und 11 Uhr. Ein Minimum an Pollenflug findet sich in den Nachtstunden.

Der Jahresgang des Fluges von Baum-, Gräser- und Kräuterpollen folgt dem Vegetationsfortschritt und wird wie der Tagesgang von meteorologischen Fakto-

ren bestimmt. So kommt es, gegeben durch die höhere Temperatur und oft längere Sonnenscheindauer, zum ersten Auftreten von Baumpollen in Süddeutschland schon Wochen vor ihrem Auftreten in Norddeutschland. Aufgrund dieser Tatsache wurden getrennte Pollenflugkalender für die einzelnen Regionen erstellt. Ein gesamtdeutscher Kalender fasst die unterschiedlichen Flugtermine in einer Darstellung zusammen.

4 Automatische Pollen-Erkennung mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung

4.1 Voraussetzungen

Dreidimensionale bildgebende Sensoren gewinnen zunehmend an Bedeutung in Biologie und Medizin (Tomographie, konfokale Laserscanningmikroskopie u. a.). Es fehlen hingegen leistungsfähige Methoden zu deren automatischen, rechnergestützten Analyse. Am Lehrstuhl für Mustererkennung und Bildverarbeitung wurde ein neues Verfahren zur Klassifikation von dreidimensionalen biologischen Strukturen und Morphologien entwickelt. Das international beachtete Verfahren findet erstmals Anwendung in einem vom BMBF geförderten Projektes zur Entwicklung eines automatischen Blütenpollenmonitors. Weitere Anwendungen in der Biologie (3D-Genexpressionsanalysen), Medizin (Zellen- und Zellkernanalysen) und Mikroskopie (Materialmorphologien) befinden sich in Arbeit; erste Ergebnisse liegen bereits vor (RONNEBERGER et al 2005, FEHR et al. 2005).

4.2 Bildinformationen

Pollen sind dreidimensionale Objekte (die meisten sind fast kugelförmig), so dass in mit einem einfachen zweidimensionalen Bild nicht die gesamte Struktur erfasst werden kann. Selbst der Mensch braucht für eine eindeutige Identifizierung die Information von verschiedenen Ebenen des Pollens. Da Pollen durch die Einbettung in ein wasserhaltiges Medium nahezu transparent werden, sind diese verschiedenen Ebenen mikroskopisch leicht zugänglich. Computerprogramme sind beim Erkennen von Objekten in der Regel immer noch dem Menschen unterlegen. So ist es nahe liegend, dass auch ein automatisches Pollenerkennungsprogramm diese dreidimensionale Information benötigt. Anders als der Mensch, der gezielt einige Ebenen anfährt, werden hier für die automatische Analyse im ersten Schritt *alle* Ebenen mit einer Digitalkamera aufgenommen.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Pollen, die wir uns für die Erkennung zunutze machen, ist deren Eigenfluoreszenz, d. h. dass die Pollen, wenn sie mit ultraviolettem Licht bestrahlt werden, grün fluoreszieren. Um auch hier die dreidimensionale Struktur zu erfassen wird hier ebenfalls ein kompletter Fluoreszenz-Bildstapel aufgenommen.

4.3 Erkennungsschritte

Nach der Aufnahme der Daten beginnt der eigentliche Mustererkennungsprozess, der im Wesentlichen in drei Schritten abläuft:

1. der Segmentierung (Ausschneiden von Teilbildstapeln, die jeweils nur noch ein Partikel enthalten),
2. der Merkmals-Extraktion (Berechnen eines „Fingerabdrucks“ oder „Zahlencodes“ für das jeweilige Partikel in einem Teilbildstapel) und
3. der Klassifikation (Zuordnung des „Zahlencodes“ zur passenden Pollen-Art, oder sonstigen Partikeln)

Im ersten Schritt werden alle Partikel, die eine rundliche Form aufweisen, und somit Pollen sein könnten, ausgeschnitten. Die besondere Herausforderung dabei sind die vielen Verdeckungen und Agglomerationen die in den Luftstaubpoben auftreten. Darüber hinaus liegen die Partikel bedingt durch die automatische Präparation in verschiedenen Ebenen. Diese Aufgabe wird im Wesentlichen mit Standard-Verfahren der 2D-Bildanalyse gelöst (für Spezialisten: Hough-Transformation, Active Contours), wobei die Algorithmen auf 3D erweitert und stark beschleunigt werden mussten.
Im zweiten Schritt, der Extraktion des „Finger-Abdrucks“ oder „Zahlencodes“ aus den jeweiligen Partikel-Bildern (bzw. 3D-Bildstapeln) steckt das eigentliche Know-how des Lehrstuhls für Mustererkennung und Bildverarbeitung der Universität Freiburg. Zunächst stellt sich aber vermutlich die Frage, wozu der Umweg über diese Fingerabdrücke überhaupt notwendig ist, und warum der Computer die aufgenommenen Bilder von den frisch gefangenen Pollen nicht direkt mit den Bildern von bekannten Pollen in der Referenzdatenbank vergleichen kann.

4.4 Vergleich Mensch-Maschine

Bilder werden im Computer in Zeilen und Spalten von Pixeln (pixel = picture element) gespeichert. Bei Grau-Bildern enthält jedes dieser Pixel einfach eine Zahl zwischen 0 und 255, wobei 0 für schwarz und 255 für weiß steht und die Werte dazwischen für die verschiedenen Graustufen. Ein direkter Vergleich von zwei Bildern hieße also, dass man das Bild eines frisch gefangenen Pollen mit dem Bild eines Pollen in der Referenzdatenbank Pixel für Pixel von links oben nach rechts unten vergleichen würde. Selbst bei zwei Bildern von ein und demselben Pollen würde das nicht funktionieren, wenn der Pollen auf dem zweiten Bild nur ein kleines bisschen verschoben oder verdreht wäre.

Da dieser direkte Vergleich also nicht funktionieren kann, wäre ein anderer nahe liegender Ansatz, einfach ein Pollenbestimmungsbuch zu nehmen, und zu versu-

chen, die Regeln dieses Buchs in ein Computer-Programm zu übersetzen. Dieser Ansatz wurde tatsächlich im Rahmen eines großen EU-Projektes von einer Europäischen Forschungsgruppe über mehrere Jahre verfolgt. Am Ende kam ein riesiges Programm heraus, das tatsächlich in der Lage war, auf den bereits vorhandenen Bildern rund fünf Pollensorten korrekt zu unterscheiden (Erkennungsrate von fast 100 %). Auf neu aufgenommenen Bildern versagte es dann aber auf der ganzen Linie und lieferte kaum bessere Ergebnisse als ein Zufallsgenerator, da die Programmierer offensichtlich doch nicht alle möglichen Variationen dieser fünf Pollensorten und Variationen bei den mikroskopischen Aufnahmebedingungen umfassend genug in dem Programm eingebaut hatten. Das grundsätzliche Problem dieses Ansatzes liegt darin, dass ein Pollenerkennungsbuch für die Fähigkeiten und Stärken eines Menschen bzw. des menschlichen Gehirns optimiert ist. Ein Computer hat diese Fähigkeiten nicht, dafür kann er aber wesentlich schneller rechnen.

4.5 Merkmalextraktion

Was wir also brauchen, ist ein Verfahren, das die Fähigkeiten und Stärken eines Computers ausnutzt. Und genau das liefern die von uns entwickelten grauwertbasierten Invarianten (SCHULZ-MIRBACH 1995, BURKHARDT und SIGGELKOW 2001). Auf der Grundlage einer klaren mathematischen Beschreibung des oben genannten Problems der Verschiebung und Verdrehung der Objekte im Bild oder im 3D-Bildstapel, gelingt es mit ihnen, aus jedem Bild eine Art „Zahlencode" zu berechnen, der für dasselbe Objekt immer exakt gleich ist, egal an welcher Position und unter welchem Winkel sich das Objekt im Bild befindet, eben „invariant" gegenüber Rotation und Translation des Objektes ist. Weiterhin sind diese Zahlencodes ähnlich bei Bildern von ähnlich aussehenden Objekten und sehr verschieden, wenn die Objekte sehr verschieden aussehen.

4.6 Klassifikation

Nachdem wir nun für das unbekannte Objekt diesen Zahlencode berechnet haben (und vorher natürlich auch für alle bereits bekannten Objekte in der Referenzdatenbank) besteht die Aufgabe „nur" noch darin, die Art von Objekten mit den ähnlichsten Zahlencodes in der Referenzdatenbank zu finden. Dies ist dann der oben erwähnte dritte Schritt, die Klassifikation, der wiederum eine eigene Forschungsrichtung für sich darstellt. Hier nutzen wir ein modernes statistisches Lernverfahren, die so genannten Support Vektor Maschinen, die bereits in vielen Bereichen in der Mustererkennung ihre klare Überlegenheit gegenüber den klassischen Verfahren (z. B. neuronalen Netzwerken) bewiesen haben. Bereits 2002 haben wir auf dieser Grundlage eine von bisher keinen anderen Arbeitsgruppe erreichte Erkennungsrate von 92 % für 26 verschiedene Pollenarten, die mit einem High-End konfokalen Laserscan-Mikroskop aufgenommen wurden, publiziert (RONNEBERGER et al. 2002 a; RONNEBERGER et al. 2002 b). Durch kontinuierliche Verbesserung des Systems konnte diese Erkennungsrate inzwischen sogar auf 98,7 % gesteigert werden. Die wesentliche Herausforderung bei dem Pollenmonitor Projekt ist nun, unsere Algorithmen so zu erweitern, dass sie auch auf Bildern von einem extremen low-cost-Mikroskop, wie es in dem Pollen-Monitor eingebaut wird, zuverlässig funktionieren.

Alles zusammengenommen haben wir hier ein System geschaffen, das nicht nur für die Erkennung von Pol-

Glossar

ALLERGEN
Eiweißmoleküle aus der Umwelt, die eine allergische Immunantwort, meist vom Soforttyp, hervorrufen können.

BASOPHILER GRANULOZYT
Weisse Blutzellen, die bei der Allergie eine wichtige Rolle spielen, da sie Rezeptoren für den allergischen Antikörper IgE auf ihrer Oberfläche tragen, durch Allergenkontakt aktiviert werden und als Folge Histamin freisetzen.

DENDRITISCHE ZELLE
Auf Antigenpräsentation spezialisiert Zellen, die die Immunantwort einleiten.

EICOSANOIDE
Biologisch aktive Lipide, die von Entzündungszellen im allergischen Geschehen gebildet und freigesetzt werden.

GENETISCHE PRÄDISPOSITION
Eine Allergie ist nicht vererbbar, wohl aber die Neigung zur Entwicklung einer Allergie.

INTERLEUKINE
Typ von Antikörpermolekülen, die bei der Allergie gebildet werden.

RAST
Radio-Allergo-Sorbent-Test: Labortest zum Nachweis allergen-spezifischer (IgE-)Antikörper im Blut.

T-HELFER-ZELLE
Untergruppe von weißen Blutzellen, den Lymphozyten, die helfen, eine Immunantwort zu induzieren und/oder aufrechtzuerhalten.

SENSIBILISIERUNG
Bildung von Allergen-spezifischen Antikörpern nach Erstkontakt mit einem Allergen.

len, sondern auch für beliebige andere dreidimensionale Objekte genutzt werden kann, da in den Programmen an keiner Stelle festgelegt ist, dass es sich um Pollen handeln muss. Alles „Wissen" über das Aussehen von Pollen bezieht das System einzig und allein aus den Beispielen in der Referenzdatenbank und einigen im Moment noch manuell auszusuchenden Kernfunktionen für die grauwertbasierten Invarianten (diese Wahl auch noch zu automatisieren, ist Gegenstand aktueller Forschung).

4.7 Ausblick

Unseres Wissens nach gibt es gerade im Bereich der Struktur-Erkennung in dreidimensionalen Daten kein anderes vergleichbares Verfahren, das ähnlich universell einsetzbar ist und trotzdem so gute Ergebnisse liefert. Dementsprechend groß ist auch das Interesse von Biologen und Medizinern an diesem Verfahren, da sich in diesen Bereichen gerade die mikroskopischen 3D-Techniken beginnen zu etablieren und durch umfangreiche automatisierte Experimente derart riesige Mengen an 3D-Bilddaten anfallen, die nicht mehr in vertretbarer Zeit „zu Fuß" ausgewertet werden können.

5 Modellierung der Pollenausbreitung mit einem Wettervorhersagemodell

5.1 Einleitung

Die Kenntnis der atmosphärischen Konzentration von Pollen ist auf zwei Gebieten von großem Interesse. Erstens möchten Patienten, die unter Heuschnupfen leiden, wissen, wann und wo hohe Pollenkonzentrationen auftreten werden. Zweitens führt die zunehmende Genmanipulation von Pflanzen zu dem Problem der Fremdbestäubung. Um die Reinheit der Pflanzen, die in der Umgebung von genmanipulierten Pflanzen wachsen, sicher gewährleisten zu können, ist es erforderlich, genau zu wissen, wie weit sich die Pollenkörner der verschiedenen Pflanzenarten ausbreiten können.

Auf dem Gebiet der Ausbreitung von anthropogenen Luftbeimengungen wurden in den letzten zwei Jahrzehnten aufwändige numerische Modelle für verschiedene räumliche und zeitliche Skalen entwickelt. Im Gegensatz dazu basiert zurzeit die tägliche Vorhersage der Pollenkonzentration allein auf semi-empirischen Verfahren. Erst in jüngster Zeit gibt es verstärkte Aktivitäten auch die Pollenvorhersage mittels Modellsimulationen durchzuführen. Der dänische Wetterdienst plant für 2007 eine operationelle Birkenpollenvorhersage und auch beim finnischen Wetterdienst gibt es Anstrengungen die Birkenpollenausbreitung mittels numerischer Simulation zu behandeln.

Dieser Beitrag zeigt den aktuellen Stand der numerischen Simulation der Ausbreitung von Pollen und beschreibt den Weg hin zu einer operationellen Pollenvorhersage mittels des Modellsystems LM-ART (LM = **L**okal-**M**odell, ART = **A**erosols and **R**eactive **T**race Gases).

5.2 Vorgehen

Um die zeitliche Entwicklung der Pollenkonzentration berechnen zu können, ist es notwendig, neben dem den Transport durch den mittleren Wind und die Ausbreitung durch atmosphärische Turbulenz, den Emissionsfluss, die Koagulation, die Sedimentation und die Deposition sowie das Auswaschen der Pollenkörner zu beschreiben. In den letzten beiden Jahren wurde am Institut für Meteorologie und Klimaforschung in Karlsruhe das Ausbreitungsmodell LM-ART entwickelt, welches auf dem Lokal Modell des Deutschen Wetterdienstes basiert. Die Abbildung 4-7 gibt einen Überblick über die individuellen Modellkomponenten von LM-ART und die notwendigen Input-Daten. Das Modellsystem berechnet räumliche und zeitliche Verteilungen von gasförmigen Spurenstoffen sowie von primären und sekundären Aerosolpartikeln darunter auch Pollen. Die Anwendung des Modellsystems LM-ART zur Simulation der Pollenausbreitung bietet sich aus mehreren Gründen an. Das meteorologische Modell LM (Lokalmodell, inzwischen COSMO-EU abgekürzt) des Deutschen

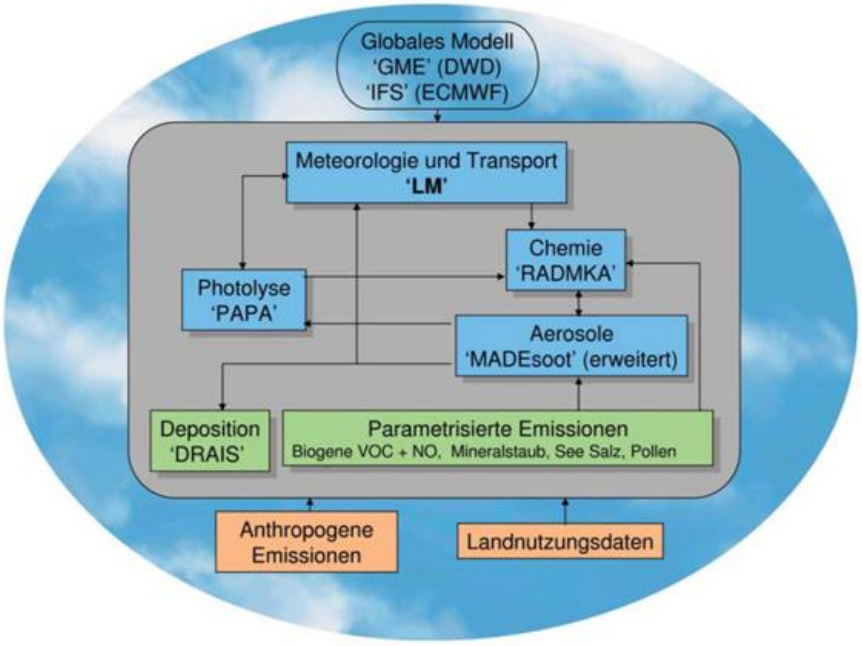


Abb. 4-7: Modellstruktur von LM-ART.

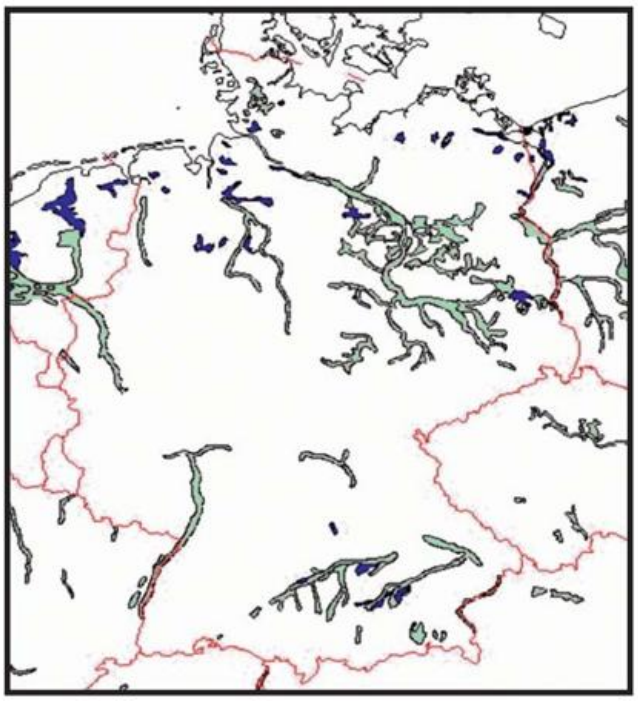


Abb. 4-8: Räumliche Verteilung der Standorte von Erlen.

Wetterdienstes (DWD) ist ein nichthydrostatisches mesoskaliges Modell und Teil des Vorhersagesystems des DWD. Das Standardmodellgebiet umfasst ganz Europa. Aufgrund der operationellen Anwendung findet eine kontinuierliche Validierung des meteorologischen Teils des Modellsystems statt. Zudem kommt es neben Deutschland auch in anderen europäischen Ländern, wie z. B. der Schweiz oder Italien zum Einsatz. Die direkte Implementierung der Ausbreitung von Gasen und Aerosolen ermöglicht die Verwendung identischer numerischer Verfahren zur Beschreibung der Transportprozesse inklusive hochreichender Konvektion. In das Modellsystem LM-ART wurde eine Parametrisierung zur Beschreibung des Pollenflusses integriert. Somit ist es möglich, die Ausbreitung beliebiger luftgetragener Pollen zu berechnen, vorausgesetzt, die geographische Verteilung der entsprechenden Pflanzen und deren Blühbeginn sowie die pflanzenspezifischen Parameter sind bekannt.

Bei der numerischen Simulation von Ausbreitungsvorgängen hängt die Güte der Vorhersage wesentlich von der richtigen der Quantifizierung der Emission ab. HELBIG et al. (2004) entwickelten erstmals eine Parametrisierung für die Emission von Pollen für verschiedene Pflanzenarten, die sowohl die meteorologischen Einflussgrößen als auch pflanzenspezifische Einflussgrößen berücksichtigt.

5.3 Modellergebnisse

Die Parametrisierung von HELBIG et al. (2004) wurde in das LM-ART-Modellsystem eingefügt. In dieser Studie wird mit dem so erweiterten LM-ART eine Episode von Erlen-Pollen simuliert, die vom 11.03.2004 bis zum 18.03.2004 andauerte. Um den Fluss der Pollenkörner in die Atmosphäre bestimmen zu können, ist es notwendig, den prozentualen Anteil an Erlen für jeden Gitterpunkt des Modellgebietes vorzugeben. Verfügbar sind zu Zeit lediglich Informationen über den potenziellen Erlenbewuchs für Deutschland und Teile der angrenzenden Länder, wie in Abb. 4-8 zu sehen. Unklar ist aber, ob es in diesen Gebieten tatsächlich Erlen gibt und wie viele Bäume pro Flächenelement vorkommen.

Die Abb. 4-9 zeigt horizontale Verteilungen der an den Stationen des Deutschen Polleninformationsdienstes

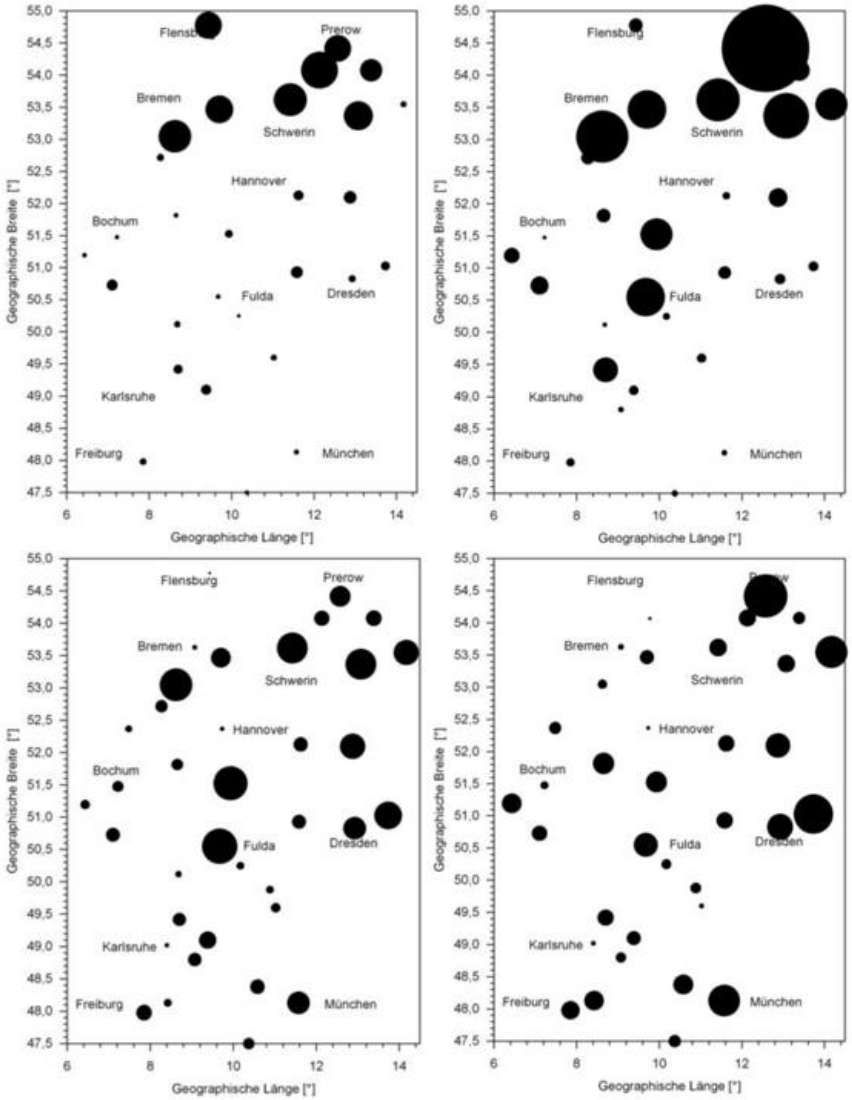


Abb. 4-9: Gemessene Tagesmittel der Konzentration von Erlenpollen in zweitägigem Abstand vom 12.03.2004 (links oben) bis zum 18.03.2004 (rechts unten).

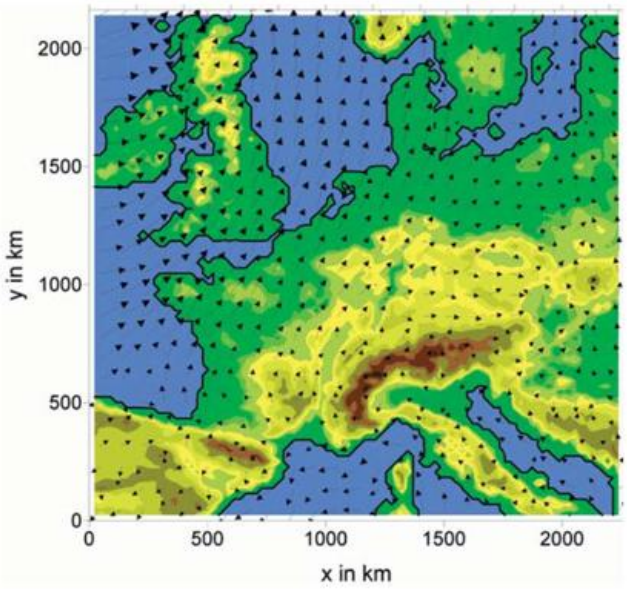


Abb. 4-10: Simuliertes Windfeld 20 m über Grund.

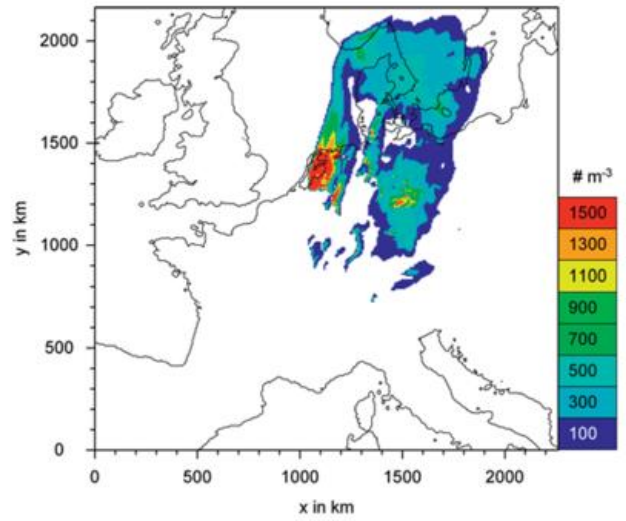


Abb. 4-11: Simulierte Verteilung der Konzentration von Erlenpollen 20 m über Grund.

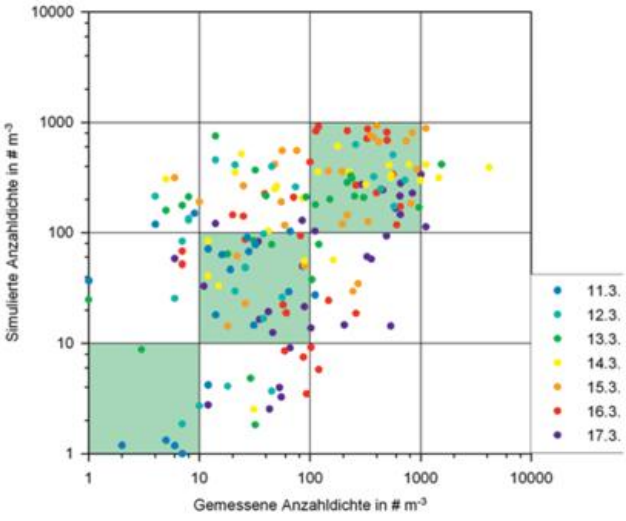


Abb. 4-12: Vergleich gemessener und berechneter Tagesmittel der Konzentration von Erlenpollen.

gemessenen und vom DWD aufbereiteten Tagesmittelwerte der Konzentration von Erlenpollen in zweitägigem Abstand während der betrachteten Episode. Die Daten beruhen auf manueller Auszählung von Pollen. Der größte Kreis stellt Konzentrationen von über 500 Pollen pro m³ dar. Die Messungen zeigen am 12. März noch geringe Konzentrationen mit einem Anstieg von Süden nach Norden. Am 14. März hat sich dieser Gradient verstärk und die Konzentrationen sind auch im südlichen Teil des Messgebietes angestiegen. In den Folgetagen gehen die Konzentrationen zwar wieder zurück, der Süd-Nord Gradient bleibt jedoch erhalten. Die Abb. 4-10 zeigt das simulierte Windfeld um 12 Uhr am 14. März 2004, die Abb. 4-11 die dazugehörige Verteilung der Anzahldichte der Erlenpollen. Die simulierte Konzentrationsverteilung gibt die Beobachtungen schon recht gut wieder. Die Abb. 4-12 zeigt einen Vergleich der gemessenen und der simulierten Tagesmittelwerte der Erlenpollenkonzentration für die gesamte Episode. Führt man eine Klasseneinteilung in schwach, mittel und stark (graue Felder in Abbildung 4-12) so wird insbesondere die hohe Belastung mit Pollen durch die Simulation recht gut wiedergegeben. Dennoch ist die Streuung noch unvertretbar hoch und zeigt die Notwendigkeit die Vorhersage zu verbessern. Die Absolutwerte der simulierten und gemessenen Konzentrationen sind von gleicher Größenordnung. Dies ist ein zufrieden stellendes Ergebnis, da für eine Reihe von Eingabedaten für die Parametrisierung des Emissionsprozesses Annahmen gemacht werden mussten, genauso wie die exakte Verteilung des Erlenbewuchses nicht zu Verfügung standen.

5.4 Zusammenfassung

Der Beitrag dokumentiert den Stand der aktuellen Arbeiten zur operationellen Vorhersage der Konzentration gesundheitsrelevanter Pollen mit dem operationellen Wettervorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes. Auf dem Weg zur einer täglichen Vorhersage stellen die Lücken in den Bestandsdaten zurzeit das größte Hindernis dar. Daneben sind wichtige Parameter für die Bestimmung der Pollenemission nicht hinreichend bekannt und müssen auf experimentellem Wege in Zusammenarbeit zwischen Forstwissenschaftlern, Biologen und Fachleuten auf dem Gebiet der atmosphärischen Ausbreitung bestimmt werden. Hier ist eine Intensivierung der interdisziplinären Zusammenarbeit unbedingt erforderlich.

Mit dem Modellsystem LM-ART wurde eine Erlenpollenepisode, die sich im März 2004 ereignete, simuliert. Die Ergebnisse wurden mit den Messungen des Netzwerks des deutschen Polleninformationsdienstes verglichen. Da bei vielen Variablen der Parametrisierung Annahmen getroffen wurden und es auch keine Daten für die exakte Lokalisierung des Erlenbewuchses gab, sind die Unterschiede von Messung und Simulation erwartungsgemäß noch recht groß. Dennoch liegen die si-

mulierten Pollenkonzentrationen in der gleichen Größenordnung wie die gemessenen. Mit zunehmender Genauigkeit der Input-Daten und unter Einbeziehung der mit den in den Kapiteln 1 und 4 dieses Beitrages beschriebenen Verfahren zu Online-Messungen der Pollenkonzentration, die dann auch als Anfangswerte bzw. für eine Datenassimilation herangezogen werden können, ist zukünftige mit einer weiteren Verbesserung des Simulationsergebnisse zu rechnen. Auch die Einbeziehung von phänologischen Modellen, wie sie in MENZEL (2007) beschrieben wurden, wird zu einer Verbesserung der numerischen Pollenflugvorhersage beitragen. Ein zusätzlicher Vorteil des hier vorgestellten Modellsystems ist darin zu sehen, dass LM-ART auch die Konzentrationen gasförmiger Verbindungen und z. B. die Verteilungen von Dieselruß liefert. Somit können allergieverstärkende Modifikationen der Pollen durch Luftverunreinigungen, wie sie in Kapitel 2 beschrieben werden, ebenfalls modellmäßig berücksichtigt werden.

Literatur

BEHRENDT, H., BECKER, W.M., 2001: Localisation release and bioavailability of pollen allergens: the influence of environmental factors. *Curr. Opin. Immunol.* **13**, 709-715.

BEHRENDT, H., EVERS, H.J., HÜTTL R.F. 1999: Der Rat der Sachverständigen für Umweltfragen. Sondergutachten für Umwelt und Gesundheit. Risiken richtig einschätzen. Statistisches Bundesamt. *Metzler-Poeschel*, Stuttgart.

BURKHARDT, H., SIGGELKOW, S., 2001: Invariant features in pattern recognition - fundamentals and applications. In: Kotropoulos, C., Pitas, I., eds., Nonlinear Model-Based Image/Video Processing and Analysis, *John Wiley & Sons*, 269-307.

DGAI 2000: Weißbuch Allergie in Deutschland 2000, *Urban & Vogel Medien- und Medizin-Verlagsgesellschaft*, München.

FEHR, J., RONNEBERGER, O., KURZ, H., BURKHARDT, H., 2005: Self-Learning Segmentation and Classification of Cell-Nuclei in 3D Volumetric Data using Voxel-Wise Gray Scale Invariants. In: Proceedings of the 27th DAGM Symposium, **3663** LNCS, *Springer*, Vienna.

FERNANDEZ-SEVILLA, D., 2006: Aerodynamic properties of pollen grains and sampling methods. Thesis, Coventry University in collaboration with University of Worcester.

HECHT, R., WINKLER, H., 1994 a: Empfehlungen zum Einsatz von Burkard-Pollenfallen bei der Erfassung von Tagespollenimmissionen. 3. Europäisches Pollenflug-Symposium, 4.-6.2.1994, Bad Lippspringe, Düsseldorf, *Vereinigte Verlagsanstalten GmbH*, 131-133.

HECHT, R., WINKLER, H., 1994 b:Empfehlungen zur Präparationstechnik, Bestimmung und Auswertung bei der Pollenflugerfassung mit der Burkard-Pollenfalle. 3. Europäisches Pollenflug-Symposium, 4.-6.2.1994 Bad Lippspringe, Düsseldorf, *Vereinigte Verlagsanstalten GmbH*, 135-141.

HELBIG, N., VOGEL, B., VOGEL, H., FIEDLER, F., 2004: Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale. *Aerobiologia* **20**, 3-19.

HOLGATE, S., CURCH, M., LICHTENSTEIN, L., (Hrsg.) 2006: Allergy, 3rd ed. *Mosby-Elsevier*, Philadelphia.

MENZEL, A., 2007: Phänologische Modelle. *Promet* **33** (1/2) 20-27.

PAYNE, W.W., 1972: Observations of harmomegathy in pollen anthophyta. *Grana* **12**, 93-98.

PULS, K.E., 1987: Der Einfluss von Witterung und Wetter auf Blütenlage, Pollenfreisetzung und Pollenflug. In: Stiftung Deutscher Informationsdienst (Hrsg.): 1. Europäisches Pollensymposium, 20./21.März 1987.

RING, J., 2004: Angewandte Allergologie. 3. Auflage, *Urban & Vogel*, München.

RONNEBERGER ,O., BURKHARDT, H., SCHULTZ, E., 2002: General-purpose Object Recognition in 3D Volume Data Sets using Gray-Scale Invariants - Classification of Airborne Pollen-Grains Recorded with a Confocal Laser Scanning Microscope. In: Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, Quebec, Canada.

RONNEBERGER, O., FEHR, J., BURKHARDT, H., 2005: Voxel-Wise Gray Scale Invariants for Simultaneous Segmentation and Classification. In: Proceedings of the 27th DAGM Symposium, **3663** LNCS, *Springer*, Vienna, Austria.

RONNEBERGER, O., SCHULTZ, E., BURKHARDT, H., 2002: Automated Pollen Recognition using 3D Volume Images from Fluorescence Mikroscopy. *Aerobiologia* **18**, 107-115.

SCHARRING, S., BRANDENBURG, A., BREITFUSS, G., BURKHARDT, H., DUNKHORST, W., v. EHR, M., FRATZ, M., GIEL, D., HEIMANN, U., KOCH, W., LÖDDING, H., MÜLLER, W., RONNEBERGER, O., SCHULTZ, E., SULZ, G., WANG, Q., 2006: Online Monitoring of Airborne Allergic Particles (OMNIBUSS): In: Biophotonics – Visions for Better Health Care, J. Popp and Marion Strehle (Hrsg.), *Wiley-VCH Verlag*, Weinheim.

SCHEID, G., BERGMANN, K.-Ch., 2004: 20 Jahre Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (1983-2003). *Allergo J.* **13**, 261-8.

SCHULZ, J., SCHMIDT, T., RONNEBERGER, O., BURKHARDT, H., PASTERNAK, T. DOVZHENKO, A., PALME, K., 2006: Fast Scalar and Vectorial Grayscale Based Invariant Features for 3D Cell Nuclei Localization and Classification. Proceedings of the 28th Pattern Recognition Symposium of the German Association for Pattern Recognition (DAGM06), Berlin, Germany.

SCHULZ-MIRBACH, H., 1995: Invariant features for gray scale images. In: Sagerer, G., Posch, S., Kummert, F., eds., 17. DAGM - Symposium „Mustererkennung", Reihe Informatik aktuell, *Springer*, Bielefeld, 14 S.

TRAIDL-HOFFMANN, C., MARIANNI, V., HOCHREIN, H., KARG, K., WAGNER, H., RING, J., MÜLLER, M.J., JAKOB, T., BEHRENDT, H., 2005: Pollen-associated phytoprotanes inhibit dendritic cell Interleukin-12 production and augment helper-type 2 cell polarization. *J. Exp. Med.* **201**, 627-635.

WINKLER, H., OSTROWSKI, R., WILHELM, M., 2001: Pollenbestimmungsbuch der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst. *TAKT-Verlag*, Paderborn 78 S.

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 133-139 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

K. BUCHER, E. WANKA

5 Das Problem der Wetterfühligkeit

The problem of meteorosensitivity

Zusammenfassung
Wetterfühligkeit ist definiert als Veränderungen des körperlichen, geistigen, seelischen oder sozialen Wohlbefindens sowie Zunahme der Inzidenz oder Symptomatik von Krankheiten, wenn diese Veränderungen mit wetterabhängigen atmosphärischen Faktoren assoziiert sind. Die meteorotropen Reaktionen des menschlichen Organismus sind abhängig von der Art und Intensität der Wirkungen der physikalischen Umwelt genauso wie von individuellen Bedingungen wie Anpassungsfähigkeit und Gesundheitszustand. Diese spielen bei der Abgrenzung der Wetterfühligkeit als Überforderungssyndrom des Organismus mit einem hohen subjektiven Anteil gegenüber Reaktionen, deren Symptomatik eindeutig einer Grunderkrankung zugeordnet werden muss, eine entscheidende Rolle.

Es existieren zahlreiche medizin-meteorologische Studien, von denen einige direkte und kausal nachvollziehbare Zusammenhänge zwischen Wetter und Befinden zeigen, viele aber miteinander verknüpfte oder synergistische Wirkungen, welche nur stochastisch nachgewiesen werden können. Dennoch konnte daraus eine Basis geschaffen werden, auf der ein Informationssystem zum Nutzen der Bevölkerung aufbaut. Ein Monitoring aller den Wettereinfluss prägender Faktoren spielt dabei eine wesentliche Rolle. Neue Untersuchungen können dabei helfen, die in vielen Fällen noch offenen kausalen Fragen zu beantworten.

Abstract
Atmospheric **r**elated **s**yndroms (ARS) are defined as changes of physical, mental or social well being and/or incidence resp. exacerbation of diseases, which are clearly associated with weather dependent atmospheric factors. Not belonging to ARS are all already etiologically (causally) clarified effects of pollutants (e.g. irritations of airways by ozone), UV-radiation (e.g. erythema) and of purely thermal origin, like cardiocirculatory insufficiency due to heat stress. The reaction of the human organism to meteorological conditions depends on different factors, such as the type and intensity of the effects of the physical environment as well as individual conditions like adaptive capacity and state of health. These play an important role to limit weather sensitivity as a syndrom of excessive demand for the organism from reactions which can be allocated to an apparent illness.

Some medical-meteorological studies show causal correlations, but many others show combined or synergistic effects, which can only be proved stochastically. Anyhow it is possible to build up the basis for an information system for the benefit of people. Monitoring of all factors which form the weather influence plays an important role. Future investigations should help to answer the causal questions.

1 Mensch und Atmosphäre

1.1 Historischer Rückblick

Die Geschichte des Interesses, der Beobachtung und der Forschung zum Thema „Wetter und Mensch" reicht nachweislich weit zurück bis Hippokrates (460-377 v. Chr.) und Aristoteles (384-322 v. Chr.). Der griechische Arzt Hippokrates hat in seiner Schrift „Luft und Wasser" darauf hingewiesen, dass Entzündungen und Allergien häufiger bei Zufuhr von tropischer Luft auftreten, während sich Koliken und Krämpfe bei Polarluftzufuhr häufen. Diese grundsätzliche Erkenntnis wird auch von neueren Untersuchungen bestätigt. Von den Griechen und Römern ist eine 12-teilige Windskala überliefert, in der dem Südostwind, dem so genannten Phönix, eine besonders nachteilige Wirkung auf das Befinden des Menschen zugeschrieben wird. Vom Namen Phönix wurde später der Name Föhn abgeleitet. Über die Jahrhunderte setzten sich Denker und Wissenschaftler mit der Problematik der Erforschung und Erklärung humanbiometeorologischer Zusammenhänge auseinander. Goethe (1749-1832), der zeitlebens über Befindensbeeinträchtigungen in Verbindung mit dem Wetter klagte und deshalb einen engen Bezug zur Meteorologie besaß, richtete als Minister in Sachsen-Weimar eines der ersten einheitlichen meteorologischen Beobachtungsnetze ein. Der Naturforscher Alexander von Humboldt (1769-1859) machte die Elemente der Atmosphäre und ihre Wirkungen nicht nur für die Pflanzen, sondern auch für die Gefühle und die Seelenstimmung des Menschen verantwortlich: „Klima umfaßt alle Veränderungen in der Atmosphäre, welche unsere Organe merklich afficieren". Im ersten Drittel des letzten Jahrhunderts brachte erstmals die fruchtbare Zusammenarbeit zwischen dem bekannten Frankfurter Kinderarzt De Rudder und dem Meteorologen Franz Linke entscheidende Anstöße für die darauf folgende rasche Entwicklung der heutigen Human-Biometeorologie in Deutschland.

1.2 Der Wettereinfluss auf den Menschen

Wetter ist ein wichtiger Bestandteil der physikalischen Umwelt des Menschen. Um Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit zu erhalten sind Anpassungsvorgänge nötig, die teilweise über die autonomen Regelsysteme des Organismus ablaufen, teilweise vom Menschen selbst gesteuert werden können. Der physiologische Ablauf der Anpassung an die atmosphärischen Umweltbedingungen hängt dabei zum Einen von der Intensität ihrer Wirkungen, zum Anderen von der Leistungsfähigkeit des Organismus ab, also vom Gesundheitszustand und damit von der physischen sowie psychischen Kondition. Man unterscheidet zwischen der Wetterfühligkeit als Auftreten von meist subjektiv empfundenen Störungen des Allgemeinbefindens zu denen auch Schlaf- und Konzentrationsstörungen sowie Beeinträchtigungen der Stimmung gehören, und der Wetterempfindlichkeit als Auftreten oder Verstärkung von Symptomen, die einer bestimmten Grunderkrankung zugeordnet werden können. Der Übergang von Wetterfühligkeit zu Wetterempfindlichkeit kann fließend, bzw. eine Abgrenzung dieser beiden Reaktionsformen von einander nur schwer möglich sein.

Um die Beziehungen zwischen atmosphärischen Umweltfaktoren und dem Befinden zu untersuchen, werden epidemiologische Methoden angewendet. Die Komplexität der Materie und der Einfluss zahlreicher Störgrößen erlauben insbesondere bei Untersuchungen zur Wetterfühligkeit mit hohem subjektiven Anteil kein Aufstellen von einfachen Ursache-Wirkungsbeziehungen. Nicht nachgewiesene Zusammenhänge lassen nicht unmittelbar auf das Fehlen einer Beziehung zwischen Gesundheit und der atmosphärischen Umwelt schließen. Auch kann sich der Mangel an räumlich und zeitlich hochaufgelösten Morbiditätsdaten nachteilig bemerkbar machen und die Fähigkeit des Organismus zur Akklimatisation (der Adaption an die atmosphärische Umwelt) das Ergebnis epidemiologischer Studien verfälschen. Das unlösbare Generalitäts-Individualitäts-Dilemma (JENDRITZKY et al. 1998) zeigt sich in der Tatsache, dass die Ergebnisse von epidemiologischen Untersuchungen nur im „Durchschnitt" für eine Gruppe, nicht aber für ein Individuum, gelten, d. h. nur eine gewisse Eintrittswahrscheinlichkeit angeben.

Die Wirkungen des Wetters oder Klimas auf die Gesundheit gehen in der Regel nicht von einem einzelnen meteorologischen Element ausgenommen der Strahlung; die Atmosphäre wirkt vielmehr komplex auf den Organismus, jedoch können Einzelelemente im Gesamtakkord der Wetterwirkung unterschiedliche Stellenwerte einnehmen. Bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen können Wärmebelastung, hohe UV-Strahlungsintensitäten und höhere Immissionskonzentrationen von Photooxidantien (z. B. Ozon) im Vordergrund stehen. Im Winter spielen z. B. beim Smog während austauscharmer Wetterlagen in städtisch-industriellen Ballungsgebieten meist gleichzeitig Kältestress und eine Schadstoffbelastung der Luft eine primäre Rolle.

1.3 Biosynoptische Forschung

Holistische Ansätze zur Beschreibung des Wetters über Wetterklassifikationen erbrachten erstaunliche epidemiologische Beziehungen bei der Untersuchung von medizinischen/biologischen Datenreihen. Der Begriff Biotropie wurde geprägt als Ausdruck für die Wirkung des Wetters auf den Menschen. Ziel der Forschung war zum Einen Hypothesen über Zusammenhänge wissenschaftlich zu untermauern, zum Anderen Risikogruppen und die Allgemeinbevölkerung über gesundheitsrelevante Risiken in Verbindung mit dem Wetter aktuell zu informieren oder zu warnen. Das Interesse an der Untersuchung biometeorologischer Zusammenhänge war dabei nicht nur auf den deutschsprachigen Raum konzentriert, so dass im Jahre 1956 die „**I**nternational **S**ociety of **B**iometeorology" (ISB) gegründet wurde, eine Gesellschaft, die Wissenschaftler der verschiedenen Disziplinen zusammenführt und im Rahmen von Tagungen und Veröffentlichungen einen fruchtbaren Meinungsaustausch ermöglicht. Der deutschsprachige Begriff Wetterfühligkeit wird im Englischen erweitert auf „**A**tmosphere **R**elated **S**yndrome" (ARS), unter dem Veränderungen des körperlichen, geistigen, seelischen und/oder sozialen Wohlbefindens zu verstehen sind. Zusätzlich zur Wetterfühligkeit wird darunter auch die Zunahme der Inzidenz oder Symptomatik von Krankheiten, wenn diese Veränderungen mit wetterabhängigen atmosphärischen Faktoren assoziiert sind (von MACKENSEN et al. 2005), verstanden, also eine Verschmelzung der beiden Reaktionsformen Wetterfühligkeit und -empfindlichkeit. Die Ergebnisse der vorwiegend korrelationsstatistischen Studien über den Wettereinfluss auf den Menschen lassen sich wie folgt zusammenfassen (BUCHER 1993):

- Das Maximum der biotropen Intensität des Wetters liegt im Bereich der stärksten Wetteränderung, wobei die Biotropie mit der Intensität der Wetteränderung zunimmt.
- Die mit Luftmassenwechsel verbundene Änderung des thermischen Milieus beeinflusst maßgebend die Art der meteorotropen Reaktion. Ihr Maximum liegt einmal auf der warmluftadvektiven Tiefdruckvorderseite, zum Anderen im Bereich der meist labil geschichteten Kaltluft auf der Tiefrückseite.
- Das Minimum der Biotropie ist im Hochzentrum zu finden; bei stärkerer Inversionsbildung sind ggf. lufthygienische, im Sommer und Winter auch thermische Belastungsfaktoren zu berücksichtigen.
- Die biotrope Wirkung des Wetters wird von landschaftsklimatischen, jahres- und tageszeitlichen Faktoren mitgeprägt, wobei die Reaktion des Menschen von pathogenetischen und individuellen Voraussetzungen abhängt.

1.3.1 Biosynoptische Wetterklassifikation

Für die Nutzung dieser Kenntnisse sowohl für zeitkritische (Vorhersage) als auch retrospektive (Studien) Zwecke ist eine objektive Analyse und Vorhersage des Wetters unter den bekannten wirkungsrelevanten Gesichtspunkten erforderlich. Hierzu eignet sich das Verfahren der Klassifizierung des Wetters, wobei die Klassen die unterschiedliche Biotropie einer Wettersituation repräsentieren und aus zur Verfügung stehenden meteorologischen Daten berechenbar sein müssen. Als objektive Parameter zur Berechnung der einzelnen Wetterklassen werden die Vorticity und das sog. Temperatur-Feuchte-Milieu verwendet, eine Größe die berechnet wird als Abweichung der Temperatur und Feuchte des aktuellen Tages vom gleitenden Mittel der Vortage (BUCHER 1993). Tab. 5-1 zeigt eine Zuordnung der bisher bekannten Forschungsergebnisse zu den vier über die zur Berechnung verwendeten Parameter definierten Klassen. Die chronologische Folge der Wetterklassen ist dabei so gewählt, dass sie dem Witterungsablauf in Mitteleuropa entspricht. Dieser wird geprägt durch die sog. Westwindzone, in der in einer gewissen Abfolge Hoch- und Tiefdruckgebiete mit den entsprechenden Übergangsbereichen vom Atlantik kommend über den Betrachtungsraum hinweggesteuert werden. Die Tabelle zeigt, dass sich gerade in den Bereichen, in denen sich die eigentliche Wetteränderung vollzieht und die durch die Klassen 2 und 4 repräsentiert werden, zahlreiche statistisch gesicherte Zusammenhänge mit medizinischen Ereignissen nachweisen lassen (BUCHER 1993, LASCHEWSKI und JENDRITZKY 2003). Aber auch die Zunahme von Befindensstörungen findet sich in diesen Änderungsbereichen, hier jedoch vorwiegend im warmluftadvektiven Bereich (Klasse 2). Häufiger dagegen konnten Zusammenhänge im Bereich spastisch-hypertoner Reaktionsformen der durch Kaltluftadvektion geprägten Klasse 4 zugeordnet werden. Im Bereich 3 der Wetterklassifikation kann es zu einer zeitlichen Überschneidung der Änderungsbereiche 2 und 4 kommen, auch aufgrund der Tatsache, dass die Wetterklassen für Zeitintervalle von 12 Stunden berechnet werden. Diese Überschneidung zeigt sich auch bei der Zuordnung der medizinischen Ereignisse, die in den meisten Fällen des Nachweises bei Klasse 2 und 4 sowie in Klasse 3 zu finden sind. Die Klasse 1 repräsentiert die Wettersituation der strahlungsintensiven Hochdrucklage, die eine für das Befinden günstige Wetterlage darstellt. Einschränkungen bestehen allerdings im Hochsommer wegen der mit dieser Lage häufig in Verbindung stehenden Wärmebelastung und in der kalten Jahreszeit aufgrund von möglichen Kältereizen oder nasskalten Nebelsituationen. Klasse 5, die als indifferente Wetterlage definiert ist, beinhaltet jene Wettersituationen, bei denen die zur Zuordnung zu den übrigen Klassen notwendigen Bedingungen nicht erfüllt werden, oder die erforderlichen Schwellenwerte der in die Berechnung eingehenden meteorologischen Größen oder daraus abgeleiteter Parameter nicht erreicht werden. Dazu gehört die Situation der Wetterberuhigung, die schwach ausgeprägten Hoch- bzw. Zwischenhochdrucklagen, aber auch Wetteränderungssituationen entsprechend den Klassen 2 bis 4, allerdings mit geringer Änderungsdynamik. Klasse 5 tritt naturgegeben in unseren Breiten am häufigsten auf.

Wetterklassen	1	2	3	4	5
Migräne		●			
Kopfschmerz		●	●	●	
Schlaftiefe		●			
Allgemeine Befindlichkeitsstörung	+	●	●		(●)
Unfallbereitschaft	+	●			
Blutungen		●			
Thrombose / Embolie		●			
Inflammatio		●			
Hypotonie	+	●	●		
Hypertonie			●	●	
Herzinfarkt	+	●		●	
Angina Pectoris	+		●	●	
Herzinsuffizienz	+	●		●	
Apoplektischer Insult				●	
Asthma		●	●	●	
Chronische obstruktive Bronchitis		●	●	●	
Chronische Polyarthritis			●	●	
Spasmen				●	
Koliken			●	●	
Phantomschmerzen		●	●		
Diabetis mellitus		●		●	
Depressionen		●			

Tab. 5-1: Wetter und Krankheiten. Statistisch gesicherter Zusammenhang (Auswahl; ● ungünstig, + günstig; Wetterklassen: **1** Hoch, **2** Warmluftadvektion, **3** zyklonaler Höhepunkt, **4** Kaltluftadvektion, **5** Indifferenz).

Bei der Interpretation der gefundenen Zusammenhänge muss natürlich beachtet werden, dass diese stochastischer Art sind und ein Rückschluss auf Kausalität nicht oder nur bedingt möglich ist. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei der Akkordwirkung des Wetters trotz der besseren Koinzidenzen der Wetterklassen mit biologischen Daten gegenüber meteorologischen Einzelelementen, die bekannten Wirkungskomplexe mit zeitlich und räumlich unterschiedlicher Gewichtung beteiligt sind. Hierbei kommt dem thermischen Wirkungskomplex eine entscheidende Rolle zu. Bei neueren Studien zum Einfluss des Wetters auf den Menschen wird dieser Tatsache Rechnung getragen: Als Confounder werden neben den Wetterklassen zusätzlich z. B. die Gefühlte Temperatur als physiologisch relevante Quantifizierung der thermischen Belastung einbezogen. Eine Untersuchung am Institut für Radiolo-

gie des Klinikums Fulda (DURDU 1998) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst kann für diese Vorgehensweise exemplarisch als Schritt in Richtung Kausalitätsforschung auf der Basis korrelationsstatistischer Untersuchungsmethoden gelten. Untersuchungsgegenstand war das Auftreten von Thrombosen in Abhängigkeit vom Wetter unter Einbeziehung der beschriebenen Wetterklassen, der Gefühlten Temperatur sowie einer jahreszeitlichen Differenzierung. Es ergab sich ein Trend in Richtung Risikozunahme bei der Wetterklasse „Hochdrucklage" bei alleiniger Berücksichtigung der Wetterklassen. Eindeutiger wurden die Ergebnisse bei einer jahreszeitlichen Differenzierung und unter zusätzlicher Berücksichtigung der Gefühlten Temperatur: Es ließen sich hochsignifikante Zusammenhänge nachweisen bei Hochdrucklagen im Winter und Gefühlten Temperaturen mit Kältestressbedingungen. Die Tatsache, dass bei Berücksichtigung der Gefühlten Temperatur als alleinigem Confounder die Zusammenhänge schwächer wurden kann interpretiert werden als Beweis für eine optimale Repräsentierung der thermischen Situation eines Bezugsraumes durch die Wetterklasse.

Die kausale Bedeutung des thermischen Wirkungskomplexes für die Thromboseentstehung zeigen Untersuchungen zur Veränderung der Bluteigenschaften bei Temperaturabnahme (KEATINGE 1995). Es konnte gezeigt werden, dass sich bei einer Abnahme der Körperkerntemperatur um 0,4 °C die Zahl der roten Blutkörperchen pro Volumeneinheit erhöht, dass außerdem die Blutviskosität genauso wie die Plasma Cholesterinkonzentration zunimmt bei gleichzeitigem Ansteigen des Blutdruckes, was als Erklärung der kausalen Zusammenhänge zwischen dem medizinischen Ereignis der Thrombose und dem thermischen Wirkungskomplex gewertet werden kann.

1.3.2 Kausalitätsforschung

Die Klärung der kausalen Zusammenhänge zwischen Wetter und Mensch steht zunehmend im Mittelpunkt der humanbiometeorologischen Forschung. Hier gibt es verschiedene Lösungsansätze, bei denen vor allem die Identifizierung der Schnittstellen zum menschlichen Organismus im Vordergrund stehen. Potentielle Kausalfaktoren müssen mit dem Wetter korrelieren, nahezu ungehindert in Innenräume eindringen, sich vor der sichtbaren Wetteränderung ändern und vom menschlichen Organismus registriert und verarbeitet werden können. Bewiesen wäre die Existenz eines solchen Kausalfaktors dann, wenn die Symptome der subjektiv Wetterfühligen durch künstlich erzeugte Änderungen dieser potentiellen Kausalfaktoren ausgelöst werden können.

Diese Bedingungen werden nahezu vollständig von niederfrequenten Luftdruckschwankungen und natürlicher elektromagnetischer Impulsstrahlung im kHz-Bereich (Sferics) erfüllt. Sferics sind durch Blitze und Reibungsvorgänge in turbulenten Luftschichten erzeugte natürliche elektromagnetische Impulsstrahlung im kHz-Bereich. Die Wirkung der Sferics ist 1999 durch eine Forschungsgruppe in Gießen untersucht worden (SCHIENLE et al. 2001). Die in einer Expositionskammer künstlich erzeugten Sferics veränderten die durch ein EEG (**E**lektro-**E**nzephalo**g**ramm) registrierten Gehirnströme subjektiv Wetterfühliger stärker als die der subjektiv Unempfindlichen. Bei keinem der beiden untersuchten Kollektive konnten jedoch die typischen Wetterfühligkeitssymptome durch die künstlich erzeugten Sferics ausgelöst werden. Zur Zeit fehlt noch eine plausible Hypothese für die Wirkungsweise der Sferics auf den Menschen. Neuere Untersuchungen in Bezug auf die Wirkung von Sferics auf den menschlichen Organismus sind nicht bekannt.

Niederfrequente Luftdruckschwankungen werden zum Beispiel hervorgerufen durch Dichte- und Geschwindigkeitssprünge in der Grenzschicht, die bei Ausbildung von Instabilitäten an Vertikalscherungen eine Wellenbildung bewirken. Durch diese sogenannten Kelvin-Helmholtz-Wellen werden Luftmassen in Vibration versetzt, deren Wirkung am Boden als niederfrequente Luftdruckschwankungen messbar ist. Die Frequenzen liegen im Bereich von 0,001 Hz bis 1 Hz, die Amplituden im Bereich 0,01 hPa bis 0,5 hPa, im Extremfall bis zu 3 hPa. Messungen dieser niederfrequenten Luftdruckschwankungen (Barometer PTB220A der Firma Vaisala) haben gezeigt, dass sich bei unterschiedlichen Wetterlagen und Windverhältnissen, typische Schwankungsmuster ergeben.

Abb. 5-1 zeigt den Verlauf der Luftdruckdifferenzen über 10 Minuten bei einer stürmischen und einer ruhigen Wetterlage. Eine Trennung von Luftdruckschwankungen, verursacht durch Änderungen des statischen Drucks, von Staudruckschwankungen (dynamischer Druck) ist dabei nicht möglich, jedoch zeigen die Messungen, dass bei stürmischem Wetter die Amplituden mit einer Grösse von einigen zehntel Hektopascal deutlich grösser sind als bei ruhigen Wetterlagen. Die

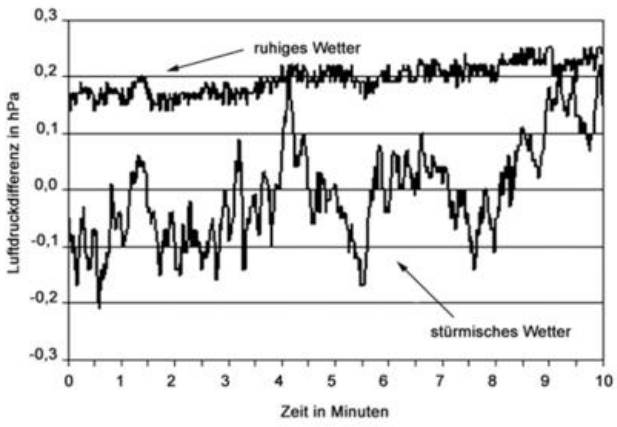


Abb. 5-1: Verlauf des Luftdruckes an einem Tag mit ruhigem (02.10.2002) und stürmischem (02.01.2003) Wetter.

Periodendauer beträgt nur wenige Sekunden. Abb. 5-2 zeigt den Verlauf der Luftdruckdifferenzen an einem Tag mit Föhn; dargestellt ist ebenfalls ein Intervall von 10 Minuten. An diesem Tag sind für die größten maximalen Amplitudenwerte von bis zu 1,17 hPa aufgetreten. In der Abbildung ist zu erkennen, dass bei Föhn Periodendauern von einigen Minuten auftreten und sich ein wellenartiges Muster ergibt, welches beispielsweise bei stürmischen Wetterlagen nicht auftritt.

Eine erste Untersuchung der Auswirkungen von niederfrequenten Luftdruckschwankungen auf den Menschen führte RICHNER (1974) an der **E**idgenössischen **T**echnischen **H**ochschule (ETH) Zürich durch. Er befragte in einer longitudinalen Studie MitarbeiterInnen einer Firma, die teilweise in klimatisierten und teilweise in nicht klimatisierten Räumen arbeiteten: Er fand einen Zusammenhang zwischen niederfrequenten Luftdruckschwankungen und der Schmerzinzidenz (Kopfschmerzen, Atembeschwerden, Narbenschmerzen u. a.). Er wies nach, dass Luftdruckschwankungen nahezu ungehindert in Räume eindringen können. Lediglich sehr hochfrequente Anteile werden gedämpft und zeitlich verzögert. Die Druckschwankungen übertragen sich vor allem über Ritzen, Spalten und undichte Stellen, werden jedoch auch von Fenstern, die wie Membranen wirken, nach innen übertragen. Statistisch gesichert konnte von Richner nachgewiesen werden, dass sich mit zunehmender Amplitude der Druckschwankungen im tieferen Frequenzbereich (Periodendauer > 4 Minuten, also < 0,004 Hz) das Befinden der Befragten im Mittel verschlechterte. Dabei sind die Korrelationen für Frauen stärker als für Männer, für Personen in klimatisierten Räumen stärker als für solche in nicht-klimatisierten. Außerdem stellte sich heraus, dass Föhnwetterlagen durch ganz typische Muster von niederfrequenten Luftdruckschwankungen ausgezeichnet sind.

Mitte der neunziger Jahre wurde eine Studie von DELYUKOV und DIDYK (1999) an der Taras Shevchenko National University durchgeführt, welche sich mit niederfrequenten Luftdruckschwankungen befasste.

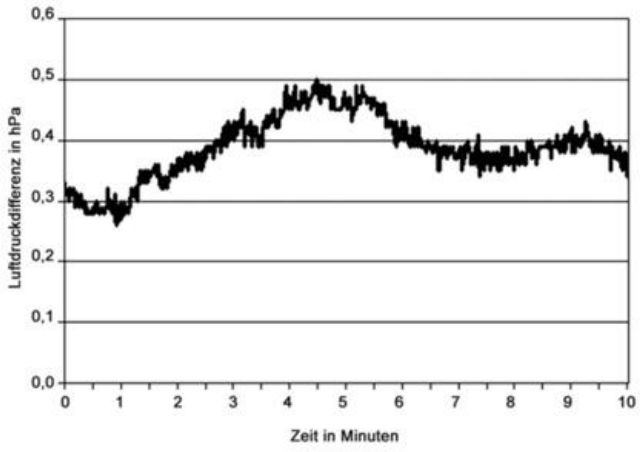


Abb. 5-2: Verlauf des Luftdruckes an einem Föhntag (16.11.2002).

Hierbei wurden gesunde Probanden künstlich erzeugten niederfrequenten Luftdruckschwankungen (Amplituden zwischen 0,3 und 0,5 hPa, Frequenzbereich zwischen 0,01 und 0,17 Hz, Expositionsdauer zwischen 15 und 75 Minuten) mit einem für die Probanden verblindeten Versuchsdesign ausgesetzt. Es konnte nachgewiesen werden, dass niederfrequente Luftdruckschwankungen einen Einfluss auf Herzfrequenz, Blutdruck, Körperkerntemperatur, Konzentrationsfähigkeit und Kurzzeitgedächtnis haben. Eine Veränderung dieser Größen kann zu Beschwerden wie Kopfschmerzen, Unwohlsein, erhöhter Unfallbereitschaft, Herzinfarkt u. a. führen und damit eine Veränderung des körperlichen, geistigen, seelischen oder sozialen Wohlbefindens bzw. eine Zunahme der Inzidenz oder Symptomatik von Krankheiten sein, die mit wetterabhängigen atmosphärischen Faktoren assoziiert ist.

Der physiologische Effekt von niederfrequenten Luftdruckschwankungen auf den menschlichen Organismus kann möglicherweise auf die sich im Aortenbogen bzw. Karotissinus befindlichen Barorezeptoren zurückgeführt werden. Diese Rezeptoren nehmen Änderungen des arteriellen Druckes wahr; ihre Hauptaufgabe ist die Stabilisierung von Blutdruck und Herzfrequenz. DELYUKOV et al. (2002) vermuten, dass diese Barorezeptoren die permanenten Änderungen des Luftdruckes registrieren und es dadurch möglicherweise zu einer Fehlregulation kommen kann, welche wiederum Wetterfühligkeitssymptome auslösen könnte.

Neuere Studien der Ludwig-Maximilians-Universität München untersuchten den Zusammenhang zwischen niederfrequenten Luftdruckschwankungen und Verkehrsunfallzahlen sowie Rettungsdiensteinsätzen im Großraum München (WANKA 2003). Die Auswertungen basierten einerseits auf unterschiedlichen meteorologischen Parametern, insbesondere den hochaufgelösten Luftdruckmessungen (Messfrequenz 1 Hz), der Physiologisch Äquivalenten Temperatur PET (HÖPPE 1999; eine Art gefühlte Temperatur), biometeorologischen Wetterklassen (BUCHER 1993) und Föhnereignissen sowie andererseits auf den Einsatzzahlen von Polizei und Rettungsdienst. Für den Zeitraum vom 1.4.2002 bis 31.3.2003 lagen 31,5 Millionen Luftdruckwerte, Informationen zu 86 805 Rettungsdiensteinsätzen und 47 706 Verkehrsunfällen vor. Für den Zeitraum vom 2.9.2002 bis 28.2.2003 lagen zusätzlich von 33 Patienten mit subjektiv empfundenen Wetterfühligkeitsbeschwerden (Kopfschmerzen, Migräne, Narben- und Phantomschmerzen) detaillierte Tagebuchaufzeichnungen vor. Die Auswertungen der Tagebücher haben gezeigt, dass statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von bestimmten Wetterfühligkeitssymptomen und unterschiedlichen Frequenzbereichen der Luftdruckschwankungen vorhanden waren. Diese Zusammenhänge waren jedoch für die Probanden mit verschiedenen Schmerzarten individuell stark unterschiedlich (WANKA 2003). Die

Auswertungen der Verkehrsunfallzahlen zeigten, dass im genannten Untersuchungszeitraum im Großraum München bei Föhn weniger Verkehrsunfälle passierten als im Durchschnitt. Stieg der Luftdruck innerhalb einer Stunde rasch an, so stiegen auch die Verkehrsunfallzahlen um bis zu 43 %. Weiterhin nahmen die Verkehrsunfallzahlen zu, wenn in bestimmten Frequenzbereichen besonders große Amplituden der niederfrequenten Luftdruckschwankungen auftraten. Bei den Rettungsdiensteinsätzen kam es nachmittags zu einer Abnahme der Einsatzzahlen um 10 %, wenn der Luftdruck innerhalb einer Stunde rasch anstieg. Die Auswertungen für verschiedene Einsatzarten haben gezeigt, dass ein rascher Luftdruckanstieg innerhalb einer Stunde 12 bis 24 Stunden vorher mit einer Abnahme der Rettungsdiensteinsätze aufgrund von internistischen Erkrankungen assoziiert war (bis zu 14 % weniger Einsätze). Sank der Luftdruck am Vormittag innerhalb einer Stunde rasch, so kam es für den Rettungsdienst zu weniger Einsätzen aufgrund von Gewalttaten wie Schlägereien, Messerstich- oder Schussverletzungen. Die Einsätze aufgrund von gewalttätigen Übergriffen stiegen jedoch an heißen gegenüber kalten Nachmittagen und Abenden deutlich an (bis zu 100 %). Kam es in dieser Zeit zu einem raschen Anstieg des Luftdruckes innerhalb einer Stunde, so nahmen die Einsätze des Rettungsdienstes aufgrund von suizidalen Handlungen, anderweitigen psychischen Erkrankungen oder Einlieferungen in psychiatrische Abteilungen um 56 % zu. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Einsatzzahlen von Polizei und Rettungsdienst im Großraum München im Untersuchungszeitraum von 12 Monaten signifikante Veränderungen im Zusammenhang zu niederfrequenten Luftdruckschwankungen aufwiesen.

2 Anwendung der bisherigen Forschungsergebnisse in der Praxis

Die Problematik bei der Anwendung von Ergebnissen der biometeorologischen Forschung in der Praxis ist ähnlich der, wie sie im Mittelpunkt bei der Diskussion bzgl. einer auf Erfahrung aufbauenden und einer evidenzbasierten Medizin steht: Fast die Hälfte der Patienten leiden unter sog. funktionellen Beschwerden, also chronische Leiden ohne Krankheitsbefund. Hier können wissenschaftliche Studien, so evidenzbasiert sie auch sein mögen, nicht wirklich weiterhelfen, solange die Akzeptanz der Beschwerden von ärztlicher Seite nicht vorhanden ist. Ähnlich ist es auch bei zwar nicht kausal, zumindest aber epidemiologisch nachweisbaren Zusammenhängen zwischen Wetter und Befindensbeeinträchtigungen. Thure von Uexküll, Begründer der Psychosomatik in Deutschland, hat vor Jahrzehnten bereits erkannt, dass Patienten eher bereit sind, gemeinsam mit den Ärzten ein therapeutisches Bündnis einzugehen, wenn die Vorstellungen des Patienten über die Krankheit bzw. ihre Ursache oder Verlauf mit dem was der Arzt vermittelt, übereinstimmen (von UEXKÜLL 1990). Aus diesem Grunde sind aktuelle Hinweise über den Wettereinfluss auf den Organismus nicht nur für den Wetterfühligen, sondern vor allem für den Arzt eine ernstzunehmende Information. Seine Unterstützung spielt bei der Risikoabschätzung für den Patienten, insbesondere des Wetterfühligen, der in der Regel selbst entscheiden muss, wie er kollektive Hinweise oder Warnungen zum Wettereinfluss individuell und aktuell verarbeiten soll, eine entscheidende Rolle.

Die kollektive Risikoabschätzung ist Aufgabe der informierenden Institution. Basis sind die in der Vergangenheit durchgeführten epidemiologischen bzw. empirischen Studien, wobei die Umsetzung der hierbei gewonnenen Ergebnisse in eine Risikobewertung und daraus abgeleitet zu Präventionsmaßnahmen aufgrund der meist sehr hohen und einen statistisch signifikanten Nachweis erlaubenden Fallzahlen gerechtfertigt ist. Die grundsätzliche Voraussetzung für eine flächendeckende objektive Risikoabschätzung in Bezug auf Wetterfühligkeit sind aus statistisch gesicherten Ergebnissen abgeleitete Modelle mit standardisierten Modellbedingungen, die als Anschlussmodelle an numerische Wettervorhersagemodelle routinemäßig eingesetzt werden.

Bei der individuellen Risikoabschätzung spielen die Kondition, d. h. das Alter, der Gesundheitszustand, aber auch andere Belastungen aus dem individuellen Umfeld eine wichtige Rolle. Vorausgesetzt dass, von extremen Situationen abgesehen, der gesunde und gut konditionierte Organismus in der Lage ist sich aufgrund der Funktionalität seiner Regelsysteme an jede Wettersituation anzupassen, kann angenommen werden, dass bei einer Risikoabschätzung die Differenz zwischen kollektiver und individueller Risikobewertung relativ gering ist. Entscheidend ist die individuelle, mit Hilfe des Arztes vorzunehmende Zuordnung zu bestimmten Risikogruppen als Voraussetzung für eine sinnvolle Nutzung humanbiometeorologischer Informationen und Warnungen.

3 Biowettermonitoring

Dass viele Menschen auf bestimmte Wetterlagen mit eingeschränktem Wohlbefinden bis hin zu Krankheitssymptomen reagieren, ist seit langem bekannt und durch zahlreiche Studien belegt. Das Institut und die Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin und das Institut für Medizinische Psychologie, beide an der Ludwig-Maximilians-Universität München, und das Institut für Demoskopie Allensbach befragten 2001 eine repräsentative Stichprobe von 1064 Bundesbürgern zu diesem Thema (HÖPPE et al. 2002).

Die Ergebnisse, die auf Selbsteinschätzungen basieren, zeigen, dass 19,2 % der Befragten angeben, dass ihre Gesundheit in starkem Maße vom Wetter abhängt.

35,3 % glauben, das Wetter habe etwas Einfluss auf die Gesundheit. Die häufigsten Symptome bei diesen wetterfühligen Befragten waren: Kopfschmerzen und Migräne (61 %), Abgeschlagenheit (47 %), Schlafstörungen (46 %), Müdigkeit (42 %), Gelenkschmerzen (40 %). 32 % der Wetterfühligen waren im Jahr vor der Befragung mindestens an einem Tag nicht in der Lage, allein aufgrund ihrer Wetterfühligkeitssymptome ihrer normalen Tätigkeit nachzugehen. Die Überwachung des Wetters unter gesundheitlichen Gesichtspunkten und Vorhersagen über den Wettereinfluss sind für Millionen von Menschen von erheblicher Bedeutung und deshalb eine Aufgabe, welche der Deutsche Wetterdienst im Rahmen der Daseinsvorsorge wahrnimmt. Hierzu gehören auch Warnungen zur thermischen Belastung (Hitzewarnungen) und Warnungen zur erythemwirksamen Strahlung der Sonne, über die im nachfolgenden Kapitel 6 dieses Heftes berichtet wird.

4 Ausblick

Zahlreiche auf internationaler Ebene durchgeführte Untersuchungen belegen den Zusammenhang zwischen der meteorologischen Umgebung des Menschen in den verschiedenen Zeitskalenbereichen Wetter, Witterung und Klima und Reaktionen im physischen und psychischen Bereich bis hin zur Verbesserung der Lebensqualität durch Nutzung für den Organismus günstiger Bedingungen des Bioklimas. Diese Zusammenhänge rechtfertigen einerseits eine auf numerischen Modellen aufbauende Vorhersage von Wettersituationen, denen entweder in Verbindung mit einer Akkordwirkung oder mit oben beschriebenen Einzelkomplexen eine Beeinflussung des Befindens und der Gesundheit oder die Auslösung bzw. Verstärkung von krankheitsbedingten Symptomen zugeordnet werden kann. Andererseits ist es möglich, auf der Basis von Bioklimamodellen eine Grundlage zu liefern für die flächenhafte Darstellung der mit dem Organismus eng verknüpften bioklimatologischen Komponenten, wie dem thermischen Wirkungskomplex. Ziel und Nutzen entsprechender Informationen und Darstellungen liegen im Planungsbereich, sowie in der Möglichkeit der Anpassung der Lebensweise oder der Anwendung von Schutzmaßnahmen, die, wie die Hitzewelle des Jahres 2003 gezeigt hat, unbedingt notwendig sind. Entsprechende Warnungen sind deshalb eine wichtige Maßnahme zur Daseinsvorsorge. Die humanbiometeorologische Kausalitätsforschung besitzt einen hohen Stellenwert, vor allem aus Akzeptanzgründen bzgl. der gefundenen Zusammenhänge, aber auch zur Ermöglichung gezielter medizinischer Maßnahmen im Rahmen von Prophylaxe und Therapie. Hierzu sind interdisziplinäre Forschungsaktivitäten notwendig unter Beteiligung von Fachleuten der Biometeorologie, Epidemiologie, Physik, Kardiologie, Neurologie, Orthopädie, Rheumatologie, Psychiatrie, Psychologie und Physiologie, wobei die Vielzahl der beteiligten Fachrichtungen die Komplexität der Zusammenhänge widerspiegelt.

Literatur

BUCHER, K., 1993: Ein Verfahren zur objektiven Klassifikation des Wetters unter biosynoptischen Gesichtspunkten. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **183**, 138 S.

DELYUKOV, A., DIDYK L., 1999: The effects of extra-low-frequency atmospheric pressure oscillations on human mental activity. *Int. J. Biometeorol.* **43**, 31-37.

DELYUKOV, A., HÖPPE P., TSYBENKO V., 2002: Investigations on the mechanism of physiological effects of air pressure fluctuations. *Proceedings of 15th Conference on Biometeorology and Aerobiology, joint with 16th Internat. Congress on Biometeorology*, 84-85, 27.10.-2.11.2002, Kansas City, USA. Ed.: American Meteorological Society, Boston, USA.

DURDU, N., CHONÉ, L., MÜLLER, H.-H., BUCHER, K., HAAS, J. P., 1998: Meteorologische Einflüsse und Thromboseentstehung, *79. Deutscher Röntgenkongress.*

HÖPPE, P., 1999: The Physiological Equivalent Temperature PET – A Universal Index for the Biometeorological Assessment of the Thermal Environment. *Int. J. Biometeorol.* **43**, 71-75.

HÖPPE, P., von MACKENSEN, S., NOWAK, D., PIEL, E., 2002: Prävalenz von Wetterfühligkeit in Deutschland. *Dtsch. Med. Wochenschr.* **127**, 15-20.

JENDRITZKY, G., BUCHER, K., LASCHEWSKI, G., SCHULTZ, E., STAIGER, H., 1997: Medizinische Klimatologie, 477-598. In: HILDEBRANDT, G., GUTENBRUNNER, Ch. (Hrsg.), Balneologie und medizinische Klimatologie, *Springer-Verlag*, Berlin.

KEATINGE, W. R., DONALDSON, G. C., 1995: Cardiovaskular mortality in winter. *Arch. Med. Res.* **54**, 2, 8-16.

LASCHEWSKI, G., JENDRITZKY, G., 2003: Praktische Umweltmedizin. 09.06 Komplexe Umwelteinwirkungen, Teil 8: Klima. *Springer Verlag*, Heidelberg, 1-44.

MACKENSEN von, S., HOEPPE, P., MAAROUF, A., TOURIGNY, P., NOWAK, D., 2005: Prevalence of weather sensitivity in Germany and Canada. *Int. J. Biometeorol.* **49**, 156-166.

RICHNER, H., 1974: Zusammenhänge zwischen raschen atmosphärischen Druckschwankungen, Wetterlagen und subjektivem Empfinden. LAPETH-8, Laboratorium für Atmosphärenphysik, *ETH Zürich*, 97 S.

SCHIENLE, A., STARK R., VAITL D., 2001: Sferics provoke changes in EEG power. *Int. J. Neurosci.* **107**, 87-102.

THIELEN, J., 1989: Mustererkennung kurzperiodischer Luftdruckfluktuationen, Zusammenhänge mit Wetterphasen und Betriebsunfallhäufigkeiten. Institut für Meteorologie und Klimaforschung der Universität Karlsruhe, Diplomarbeit, 87 S.

UEXKÜLL, T. von, KÖHLE, K., 1990: Funktionelle Syndrome in der inneren Medizin. In: UEXKÜLL, T. von (Hrsg.), Psychosomatische Medizin, *Urban & Schwarzenberg-Verlag*, München, 4. Auflage.

WANKA, E. R., 2003: Messung und Analyse niederfrequenter Luftdruckschwankungen in München. Assoziationen zu Rettungsdiensteinsätzen und Verkehrsunfällen sowie Symptombefragungsdaten Wetterfühliger. Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln in Kooperation mit Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München, Diplomarbeit, 102 S.

WANKA, E., HÖPPE P., 2005: Human biometeorological relevance of low frequency air pressure oscillations. *Meteorol. Z.* **14** (2) 279-284.

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 140-147 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

P. BECKER, K. BUCHER, A. GRÄTZ, C. KOPPE, G. LASCHEWSKI

6 Das Medizin-Meteorologische Informationsangebot für den Gesundheitssektor und die Öffentlichkeit

Human-biometeorological information for the health sector and the general public

Zusammenfassung
Der **D**eutsche **W**etter**d**ienst (DWD) erstellt eine Reihe von medizin-meteorologischen Informationen. Diese Informationen lassen sich in vier Gruppen einteilen: (1) Informationen, die täglich bereit gestellt werden (z. B. biometeorologische Hinweise, UV-Vorhersagen), (2) Informationen, die während einer bestimmten Jahreszeit erstellt werden (z.B. Pollenflugvorhersage), (3) Warnungen, welche herausgegeben werden, wenn eine potentiell gefährliche Situation vorhergesagt wird (z. B. Hitzewarnung, UV-Warnung) und (4) bio-klimatologische Informationen, die nach Bedarf erstellt werden (z. B. Bioklimakarten, Kurklimagutachten). Die medizin-meteorologischen Informationen richten sich an unterschiedliche Zielgruppen. Während sich die Vorhersagen und Warnungen hauptsächlich an die breite Öffentlichkeit und, wie im Falle der Hitzewarnung an das Gesundheitswesen, richten, stellen die Bioklimakarten eine wertvolle Arbeitsgrundlage für das Beantworten von Fragen der Raum-, Stadt-, Kurort- und Standortplanung, aber auch zur individuellen Beratung der Bevölkerung dar.

Abstract
The German Meteorological Service (DWD) provides a set of human-biometeorological information. This information can be divided into four groups: (1) information that is provided on a daily basis (e.g. biometeorological tips, forecast of the UV-index), (2) seasonal information (e.g. pollen forecast), (3) warnings that are issued in case a situation with potentially adverse effects for human health is forecasted (heat-warnings, UV-warnings), and (4) bioclimatological information which is provided on demand (e.g. bioclimatological maps, certificates for health resorts). There are different target groups for the human-biometeorological information. Whereas forecasts and warnings are mainly targeted to the general public and, like the heat warning, also to the health authorities, bioclimatological maps provide a valuable basis for different questions regarding regional and urban planning and for the consultation of individuals.

1 Einleitung

Von Seiten der Öffentlichkeit und auch der Medien besteht ein enormes Interesse an medizin-meteorologischen Informationen. Gleichzeitig erlauben die bisher auf diesem Gebiet gewonnenen Erkenntnisse den Aufbau und Betrieb eines umfangreichen Informationsangebotes, welches Dank der elektronischen Medien wie Internet in bisher nicht gekannter Aktualität sowie in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung den Interessenten zur Verfügung gestellt werden kann. Dabei kommt der graphischen Darstellung dieser Information die größte Bedeutung zu. Der größte Teil des medizin-meteorologischen Informationsangebotes wird in Form von Vorhersagen zur Verfügung gestellt. Zum Schutz vor lebensbedrohlichen Situationen werden zusätzlich Warnungen erstellt und an die relevanten Zielgruppen (Bevölkerung, Einrichtungen des Gesundheitswesens) weitergegeben. Das Angebot an medizin-meteorologischen Informationen des Deutschen Wetterdienstes umfasst u.a. Hitzewarnungen, UV-Vorhersagen und -Warnungen, Pollenflugvorhersagen, biometeorologische Hinweise, Bioklimakarten und Informationen zum Kurklima.

2 Hitzewarnungen

Von ganz besonderer Bedeutung sind die Hitzewarnungen. Die Hitzewelle im Jahr 2003 in Westeuropa zeigte deutlich die Gefahr, die eine lange andauernde extreme Wärmebelastung für die Gesundheit des Menschen bedeuten kann. Besonders betroffen von solchen Situationen sind geschwächte, ältere und pflegebedürftige Menschen sowie Kleinkinder. In Frankreich waren nach amtlichen Angaben 15 000 Todesfälle auf Wärmebelastungseinwirkungen zurückzuführen. Aber auch in Deutschland dürfte anlässlich der Hitzewelle im August 2003 die Zahl der „Hitzetoten“ 7000 überstiegen haben. Dabei kann es als sehr wahrscheinlich angesehen

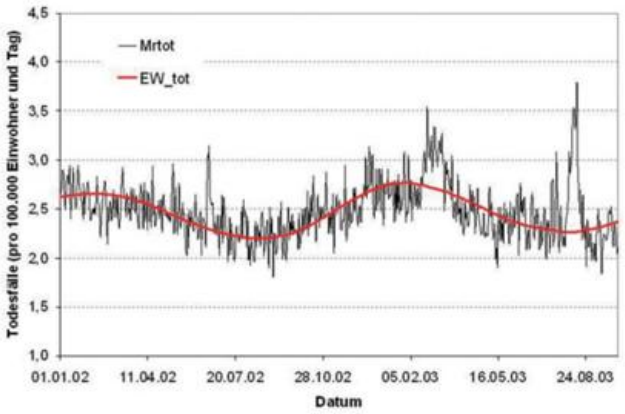


Abb. 6-1: Jahresgang der Mortalität im Zeitraum Januar 2002 bis September 2003.

werden, dass Todesfälle während Hitzewellen wirklich durch die thermische Belastung und nicht durch erhöhte Ozonwerte verursacht werden. Hitze-Warnsysteme können helfen, die Zahl der „Hitzeopfer" zu verringern.

In Abb. 6-1 ist der Verlauf der Anzahl der Todesfälle pro 100 000 Einwohner in Baden-Württemberg für den Zeitraum Januar 2002 bis September 2003 dargestellt. Neben dem Jahresgang (Erwartungswert EW_tot dargestellt durch die rote Linie) sind auch kurzfristige Schwankungen der Mortalitätsrate zu erkennen (aktuelle Tageswerte Mrtot dargestellt durch die schwarze Linie). Besonders fallen hierbei ein kurzfristiger Anstieg im Juni 2002 (Hitzewelle), ein längerer Anstieg im Februar/März 2003 (Grippeepidemie) und ein etwa zweiwöchiger Anstieg im August 2003 (Hitzewelle) ins Auge. Dabei ist die maximale Anzahl der Todesfälle pro Tag während der Hitzwelle im August 2003 trotz des niedrigeren Erwartungswertes für den Sommer höher als während der Grippeepidemie im März des gleichen Jahres.

Nach den derzeit vorliegenden Klimastudien steigt in Zukunft die Wahrscheinlichkeit für Hitzewellen und besonders warme Tage (z. B. IPCC 2007). Zusätzlich wird eine Intensivierung dieser Hitzewellen erwartet. Daher wurde in Deutschland ein Hitzewarnsystem installiert, welches vor starker und extremer Wärmebelastung warnt (BECKER 2005). Sobald bestimmte Schwellenwerte der Gefühlten Temperatur überschritten werden, erfolgt eine Hitzewarnung. Unterschieden werden die Warnstufen „starke Wärmebelastung" (etwa 32 °C Gefühlter Temperatur) und „extremer Wärmebelastung" (etwa 38 °C Gefühlter Temperatur). Dabei sind die eben genannten Schwellenwerte keine festen Werte, sondern werden in Abhängigkeit der aktuellen Witterung bestimmt, um die Anpassung des menschlichen Organismus an seine thermische Umwelt zu berücksichtigen. Die Gefühlte Temperatur wird für Außenbedingungen berechnet und beinhaltet neben der Lufttemperatur auch die Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit sowie die Strahlungstemperatur. All diese meteorologischen Elemente beeinflussen den Wärmeaustausch des menschlichen Körpers mit seiner Umgebung und somit das Maß an thermischer Belastung, welcher ein Mensch ausgesetzt ist. Zudem passt sich der Mensch zum einen durch geändertes Verhalten aber auch rein physiologisch an seine thermische Umwelt an. Diese physiologische Anpassung, auch Akklimatisation genannt, erfolgt durch eine Verbesserung der Mechanismen der Wärmeabgabe (z. B. schnelleres Einsetzen des Schwitzens, erhöhte Schweißabgabe, bessere Durchblutung der Peripherie) bereits nach wenigen Tagen der Wärmeexposition.

Die meteorologische Komponente des Hitzewarnsystems basiert auf dem sogenannten HeRATE-Ansatz (**H**ealth **R**elated **A**ssessment of the **T**hermal **E**nvironment) (KOPPE 2005). Dieses Verfahren verbindet einen Ansatz, der die kurzfristige Anpassung des Menschen an die lokale Witterung berücksichtigt, mit einem thermophysiologisch relevanten Bewertungsverfahren (Gefühlte Temperatur). Auf diese Weise wird ein Schwellenwert (absoluter Teil), über dem negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit erwartet werden, im Laufe eines Jahres modifiziert, so dass er im Frühsommer niedrigere Werte annimmt, da die Menschen noch nicht an warme Bedingungen angepasst sind und im Hochsommer höhere Werte, da anzunehmen ist, dass bereits eine Akklimatisation stattgefunden hat (relativer Teil). Auch für unterschiedliche Regionen ergeben sich so in Abhängigkeit der vorangegangenen Witterung unterschiedliche Schwellenwerte. Der absolute Teil basiert auf den Belastungsstufen nach VDI (**V**erein **D**eutscher **I**ngenieure) und soll sicherstellen, dass nur die Situationen als potentiell belastend eingestuft werden, die bestimmte Minimalkriterien erfüllen. Der relative Teil des HeRATE Verfahrens modifiziert diese Belastungsstufen in Abhängigkeit der Witterung der letzten 30 Tage mittels eines gewichteten Mittelwertes der Gefühlten Temperatur. Die Tage, die nahe am aktuellen Tag liegen bekommen dabei ein höheres Gewicht, als weiter zurückliegende Tage.

Gewarnt wird bei Bedarf täglich gegen 10 Uhr MESZ für den aktuellen Tag und den Folgetag. Dabei wird nur die Warnung für den aktuellen Tag ins Internet gestellt. Die Warnung für den Folgetag geht an die Einrichtungen des Gesundheitswesens. Der Informationsfluss im Falle des Überschreitens der Schwelle zur starken Wärmebelastung ist in Abb. 6-2 dargestellt. In Ergänzung liefert die Hitzevorinformation eine entsprechende

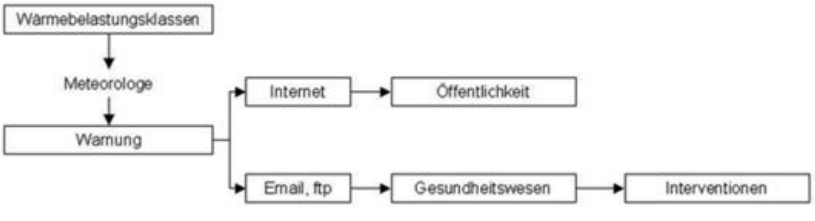


Abb. 6-2: Informationsfluss des Hitzewarnsystems.

Vorhersage für den zweiten bis siebten Folgetag.

Der Deutsche Wetterdienst regionalisiert seine Warnungen bis auf die Ebene der Landkreise. Dabei wird auch die Höhenlage berücksichtigt. Diese Vorgehensweise hat sich bewährt und wird daher bei der Hitzewarnung wie auch der Hitzevorinformation praktiziert. Die Warnungen richten sich sowohl an die Öffentlichkeit als auch direkt an die Institutionen der Gesundheitsressorts der Länder bzw. an die Lagezentren der Innenministerien zur weiteren Verbreitung. Insbesondere Pflege- und Altenheime können so die erforderlichen Interventionsmaßnahmen initiieren. Die Hitzewarnungen des Deutschen Wetterdienstes sind unter www.wettergefahren.de sowie unter www.dwd.de abrufbar.

3 UV-Index: Vorhersagen und Warnungen

3.1 Vorhersagen

Die Vorhersagen der UV-Strahlung bieten der Öffentlichkeit eine für die Gesundheit wichtige Information, weil eine zu starke UV-Exposition mit gesundheitlichen Risiken verbunden ist. Dazu gehören Hautschäden (Sonnenbrand, frühzeitige Hautalterung, Hautkrebs), aber auch Schäden an den Augen (Katarakte) und eine Schwächung des Immunsystems. Die Intensität der sonnenbrandwirksamen UV-Strahlung wird mittels des UV-Index angegeben, eines international standardisierten Maßes. Die Vorhersagen des UV-Index helfen bei der Risikobeurteilung. Über die Beachtung einfacher Verhaltensregeln ermöglichen sie ausreichenden UV-Schutz bei gesundheitlich wünschenswerten Aktivitäten im Freien. Sie sind damit ein wichtiges Instrument zur Prävention von Gesundheitsschäden.

Auf der Website des Deutschen Wetterdienstes www.uv-index.de kann sich die Öffentlichkeit sowohl über den UV-Index im heimatlichen Deutschland als auch bei beruflichen oder privaten Reisen über den UV-Index weltweit informieren. Die Öffentlichkeit kann dabei sicher sein, dass die Werte überall vergleichbar sind, weil sie nach einem einheitlichen, international anerkannten Verfahren berechnet werden. Die UV-Index Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes werden als Anschlussverfahren an die numerischen Wetterprognosen erstellt. Für Europa basieren sie auf dem Lokalmodell (COSMO-EU), für die anderen Gebiete auf dem **G**lobalen **M**odell (GME) des DWD. Die Präsentation des UV-Index erfolgt gemäß den weltweit gültigen Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO 2002) (Abb. 6-3). Auf der Website des globalen WHO-UV-Projekts „Intersun“ http://www.who.int/uv/ steht ein Graphikpaket mit den empfohlenen Darstellungen zum Herunterladen zur Verfügung.

Die Vorhersage des UV-Index UVI erfolgt beim DWD in einem 5stufigen Verfahren: Die den Erdboden erreichende sonnenbrandwirksame UV-Strahlung wird ins-

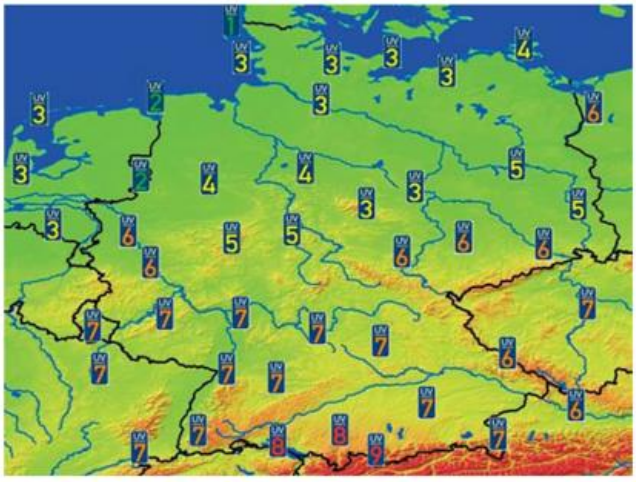


Abb. 6-3: Vorhersage des UV-Index für Deutschland für den 17.08.2006.

besondere durch die stratosphärische Ozonschicht stark vermindert. Auf der Grundlage von Satellitenmessungen wird täglich eine globale Verteilung des Ozons ermittelt. Sie dient als Ausgangspunkt für eine numerische Vorhersage des Ozons für die Folgetage. In Abhängigkeit vom vorhergesagten Gesamtozon und dem Sonnenzenitwinkel (SZA) wird dann ein großräumiger UVI berechnet. Dazu ist eine Berechnung des Transfers der UV-Strahlung durch die Atmosphäre erforderlich. Es werden spezielle, mit dem Strahlungstransfermodell STARneuro (SCHWANDER et al. 2001) abgeleitete, sehr schnelle Algorithmen (**Look**up **T**ables LUT) verwendet. Die LUT wurden getrennt für jede Hemisphäre, für den 15. jeden Monats und für die zonalen Klimabereiche „tropisch“, „subtropisch“, „mittlere Breiten“, „subarktisch“, „arktisch“ ermittelt. Jeder der LUT hat eine Auflösung von 10 DU zwischen 90 und 700 DU und 1° im Sonnenzenitwinkel (SZA) zwischen 0° und 90°. Die Interpolation zwischen den Basiswerten erfolgt linear im Ozon und linear im Kosinus von SZA. Der großräumige UVI wird berechnet für Meereshöhe, wolkenlosen Himmel, **a**erosol**o**ptische **D**icke (AOD) bei 550 nm von 0,20, für den Aerosoltyp „kontinental durchschnittlich“ entsprechend einer Aerosolabsorption (**S**ingle **S**cattering **A**lbedo, SSA) bei 280 nm von 0,8879 und eine UV-Albedo von 3 % (sommerliches Gras).

Die UV-Bestrahlungsstärke am Boden kann durch Streuung und Absorption durch Aerosole vermindert werden. In der Vorhersagestufe 2 erfolgt die Anpassung des großräumigen UVI an die aktuellen Werte der AOD und SSA (STAIGER and KOEPKE 2005). Weil zur Zeit noch keine entsprechenden Vorhersagen verfügbar sind, wird dazu eine saisonal und regional variierende Klimatologie verwendet. Sie ist aus Monatswerten der gemessenen AOD durch die NASA (KAUFMAN et al. 2002) abgeleitet. In den Lücken über den Wüsten werden langjährige Werte von TOMS (TORRES et al. 2002) als Werte zweitbester Qualität benutzt. Aus dem **G**lobalen **A**erosol**d**aten**s**atz GADS (KOEPKE et al. 1997) wurden die Variationen der

SSA und die AOD-Werte für die Lücken über den Polargebieten abgeleitet. Der Anpassungsfaktor gilt für Meereshöhe und hängt ab von AOD, SSA und SZA Er wird berechnet über eine Parametrisierung von Aerosolstreuung und -absorption, der jeweils ein Polynom zweiten Grades im Logarithmus der Eingangswerte zugrunde liegt. Die Parametrisierung hat eine Auflösung in SZA von 5° zwischen 0° und 90°, in der AOD von 0,05 zwischen 0,00 und 2,00. Die Parametrisierung wurde durchgeführt für die Aerosoltypen „kontinental durchschnittlich" (SSA bei 280 nm 0,8879), „urban" (0,7787), and „maritim rein" (0,9840).

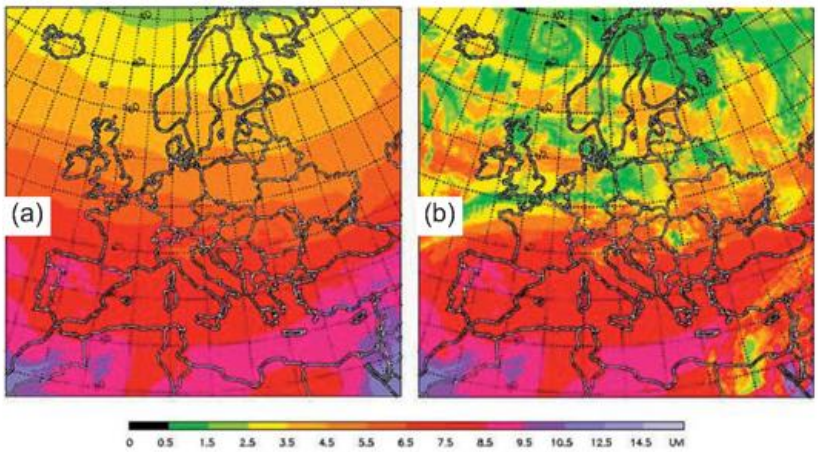


Abb. 6-4: Vorhersage des UV-Index unbewölkt (a) und bewölkt (b) für Europa (17.08.2006).

Die Höhe eines Ortes über dem Meeresspiegel beeinflusst die UV-Bestrahlungsstärke wesentlich; sie nimmt mit der Höhe um etwa 8 bis 10 % per 1000 m zu. Die Beträge werden größer, wenn die Luft durch Aerosole getrübt ist. In der Vorhersagestufe 3 wird der großräumige UVI an eine beliebige Höhe zwischen –500 und +9000 m über NN angepasst. Der Anpassungsfaktor hängt ab von der Höhe über NN, AOD, SSA und SZA. Die Parametrisierung erfolgte aus dem Logarithmus der mit STAR-neuro modellierten Werte über Polynome zweiten Grades für die Rayleigh Streuung (AOD = 0,00) und getrennt für die Aerosolabhängigkeiten. Die Parametrisierung hat eine Auflösung im SZA von 5° zwischen 0° und 90°, in der AOD von 0,05 zwischen 0,00 und 2,00, in der Höhe von 500 m. Als Basiswerte der SSA dienten die in Stufe 2 genannten Aerosoltypen.

Die Albedo des Untergrundes hat im UV vergleichsweise geringe Werte von 3 % für eine Sommerwiese und etwa 8 % für die Meere. Nur für Bedingungen von Schnee und Eis ist sie signifikant erhöht. Insbesondere bei Neuschnee kann fast das gesamte UV reflektiert werden. In der Vorhersagestufe 4 wird der Albedoeffekt über einen Faktor berücksichtigt, der zwischen einer regionalen Albedo und homogen mit Schnee (Eis) bedecktem Gelände (Inlandeis von Grönland und Meereis) unterscheidet.

Eine neue aus den Reflexionsmessungen von TOMS abgeleitete Klimatologie der UV-Albedo der Erdoberfläche (TANSKANEN 2004) ermöglicht es im schneefreien Fall, die saisonal und regional variierende Albedo des Untergrundes bei der Vorhersage einzubeziehen. Für homogen mit Schnee/Eis bedecktes Gelände werden Regressionsgleichungen angewendet, die von der Schneequalität, Neu-, Altschnee, von einem SZA größer oder kleiner 65° und von der Höhe über NN abhängen. Die Albedo frisch gefallenen Schnees wird angesetzt, wenn der Wassergehalt der Schnee/Eisdecke innerhalb der letzten 24 Stunden zugenommen oder einen maximalen Wert von 10 mm H_2O (Eisschild der Antarktis und Grönlands) erreicht hat. Die regionale UV-Albedo eines Ortes wird von Flächen von bis zu 20 km Entfernung mitbestimmt. Außerhalb der polaren Bereiche sind immer schneefreie Stellen vorhanden, die zu einer „regionalen Albedo" geringer als der von homogen bedeckten Flächen führen. Solche Stellen sind Bäume, Felswände, Straßen, Dächer und Gebäude. Angewendet wird ein Algorithmus, der aus multipler Regression modellierter gegen gemessene Werte des UV-Index abgeleitet ist (LAPETA et al. 2001), wenn die Schneebedeckung 0,02 m überschreitet. Er verlangt als Input Schneehöhe und Variationen der Schneehöhe in den vergangenen vier Tagen. Die benötigte Schneehöhe wird parametrisiert aus dem Wassergehalt der Schneedecke über Faktoren von CASPAR (1962). Im Fall, dass sich der Wassergehalt der Schneedecke in den letzten vier Tagen nicht verändert hat, wird Altschnee angenommen. In den anderen Fällen wird von einer linearen Umwandlung von Neu- zu Altschnee ausgegangen, um die Schneehöhe zu berechnen, abhängig vom letzten Tag mit einer Zunahme in der Schneehöhe.

Der Wolkenmodifikationsfaktor dient der Anpassung des UV-Index unbewölkt an die Bewölkungsverhältnisse (Abb. 6-4). Er ist empirisch von der COST-Aktion 713 „UV-B-Vorhersage" empfohlen (VANICEK et al. 2000) und hängt von den Bedeckungsgraden in den Wolkenstockwerken tief, mittel und hoch ab. Der geringste Wolkenmodifikationsfaktor aus den drei Wolkenstockwerken wird verwendet. Die COST-Aktion 726 „Langfristige Änderungen und Klimatologie der UV-Strahlung über Europa" hat Algorithmen validiert, die aus der Globalstrahlung im sichtbaren Bereich den Wolkenmodifikationsfaktor im UV ableiten (KOEPKE et al. 2006). Die Globalstrahlung wird in den DWD-Modellen unter Auswertung aller Schichten vorhergesagt, so dass über weiterentwickelte Wolkenmodifikationsfaktoren eine Verminderung der Varianz in der Vorhersage des UV-Index bewölkt zu erwarten ist.

3.2 Warnungen

In den Frühjahrs- und Frühsommermonaten weist das stratosphärische Ozon aus natürlichen Gründen eine

erhebliche Variabilität von Tag zu Tag auf, sie kann an Einzeltagen um mehr als 20 % gegenüber dem Vortag vermindert sein (Streamer, Miniholes). In dieser Jahreszeit ist der Organismus noch nicht an die im Jahresverlauf zunehmende Strahlung angepasst, so dass an solchen Tagen durch den UV-Warndienst des Deutschen Wetterdienstes gesondert auf die jahreszeitlich erhöhte UV-Intensität hingewiesen wird. Eine Warnung vor saisonal (1. April bis 10. Juni) deutlich erhöhter sonnenbrandwirksamer UV-Intensität aufgrund erniedrigten stratosphärischen Ozons wird ausgesprochen, wenn der vorhergesagte Wert des Gesamtozons mehr als 20 % unter dem langjährigen Wert der Dekade liegt, wenn gleichzeitig für den gesamten Tagesverlauf und auch zum erwarteten Tagesmaximum ein höchstens gering bewölkter Himmel zu erwarten ist und ein Mindestwert des UV-Index von 5,0 erreicht bzw. überschritten wird. Vor absolut erhöhter sonnenbrandwirksamer UV-Strahlung wird in der Zeit vom 1. Juni bis 31. August gewarnt, wenn der UV-Index $\geq 8{,}0$ in Nord- und Ostdeutschland und UV-Index $\geq 8{,}5$ sonst beträgt. Der Warnung zugrunde gelegt ist der für den Fall wolkenlosen Himmels zu erwartende maximale Wert des UV-Index. Die Warnschwellen zu absolut erhöhter sonnenbrandwirksamer UV-Strahlung in Deutschland sind aus strahlungsklimatologischen Gesichtspunkten festgelegt. Alle Warnungen sind auf Landkreisebene verfügbar.

4 Pollenflugvorhersage

Ein weiteres bedeutendes Informationsangebot der Medizin-Meteorologie stellt die Pollenflugvorhersage dar (Abb. 6-5). Allergien gehören zu den großen gesundheitlichen Herausforderungen der westlichen Industriegesellschaften (für nähere Informationen siehe auch Kapitel 4 „Allergene Pollen“ in diesem Heft). Allein in Deutschland gibt es rund zwölf Millionen Pollenallergiker, Tendenz steigend. Für die Betroffenen stellt die Allergie eine erhebliche Einschränkung ihrer Lebensqualität und ein ernst zunehmendes gesundheitliches Risiko dar. Die Beschwerden reichen von brennenden Augen und lästigem Niesreiz bis hin zu lebensbedrohlichen Asthmaanfällen. Seit Anfang der 80er-Jahre erstellt der DWD – in Kooperation mit der Stiftung Deutscher **P**ollen**i**nformations**d**ienst (PID) – Pollenflugvorhersagen für die sechs allergologisch wichtigsten Blütenpollen Hasel, Erle, Birke, Süßgräser, Roggen und Beifuß. Dabei wird Deutschland in 28 Regionen unterteilt.

Die Vorhersagen basieren auf den Daten aus dem bundesweiten Pollenmessnetz des PID sowie den Wettervorhersagen des DWD. Berücksichtigt wird auch der Wetterzustand zum Zeitpunkt der Messungen selbst, um eine Trennung der wetterbedingten von der blühphasenbedingten Abschwächung des Pollenfluges vornehmen zu können. Die phänologischen Daten des DWD ergänzen die Basis der Vorhersage. Sie geben Anhaltspunkte über den Beginn der Blühphasen der allergenen Pflanze und damit auch für den Beginn des Pollenfluges. Die Vorhersagen werden täglich von Sonntag bis Freitag erstellt. Seit März 2005 werden die Informationen den Allergikern im Internet zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurde ein Newsletterservice ins Leben gerufen. Mit diesen Produkten wird den Betroffenen die Möglichkeit gegeben, ihre Lebensweise mit Hilfe der Pollenflugvorhersagen des Deutschen Wetterdienstes an die aktuelle Pollenflugsituation anzupassen. Zum Anderen stellt sie eine Hilfe für den Allergologen dar beim Erkennen der Ursache allergischer Reaktionen bei den Patienten sowie bei der Empfehlung prophylaktischer Maßnahmen. Aufgrund der Berücksichtigung orografischer und geografischer Abhängigkeiten bei der Pollenflugvorhersage kann für Allergiker die Möglichkeit gegeben werden, dem Pollenflug kurzfristig zu entfliehen durch Aufenthalt in höheren Lagen, in denen noch kein oder in geringerem Maße Pollenflug auftritt oder auch in den Küstenbereich oder auf Inseln mit geringerem Pollenaufkommen.

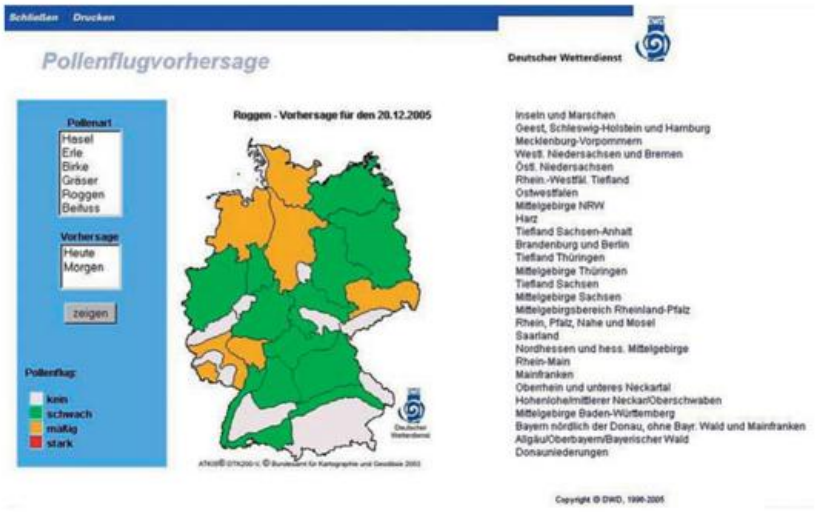


Abb. 6-5: Pollenflugvorhersage des DWD im Internet.

4 Medizin-Meteorologische Hinweise

Es ist seit langem bekannt und wurde in vielen Studien belegt, dass Menschen auf bestimmte Wetterlagen mit reduziertem Wohlbefinden bis hin zu Krankheitssymptomen reagieren. Daher sind Vorhersagen des Biowetters für Millionen von Menschen von erheblicher Bedeutung. Der Deutsche Wetterdienst erstellt deshalb von Sonntag bis Freitag täglich Medizin-Meteorologische Hinweise. Diese Vorhersagen ermöglichen es den betroffenen Menschen, ihren Tagesablauf an den zu erwartenden Wettereinfluss anzupassen, Risiken zu meiden oder wenigstens zu vermindern. Zur Vermeidung von Suggestivwirkungen durch Medizin-

Meteorologische Hinweise und zur ausschließlichen Erreichung von Betroffenen bzw. Interessierten werden aktive Übermittlungswege gewählt, wie der telefonische Anrufdienst oder die Internetseiten des DWD. Außerdem werden die Informationen in einer mit Medizinern abgestimmten Form erstellt. Die Basis hierfür bildet eine Studie, die unter Mitwirkung der Ärzteschaft durchgeführt wurde. Vertreter aus der Wissenschaft sowie der Landesärztekammer Hessen waren konzeptionell und auch während der Erprobungsphase des Informationssystems beteiligt.

6 Bioklimakarten

In Bioklimakarten werden die thermischen Umweltbedingungen flächendeckend dargestellt. Für Fragen der Raum-, Stadt-, Kurort- und Standortplanung, aber auch zur individuellen Beratung der Bevölkerung stellen sie eine wertvolle Basis dar. Je nach Problemstellung werden Karten mit unterschiedlicher Auflösung benötigt.

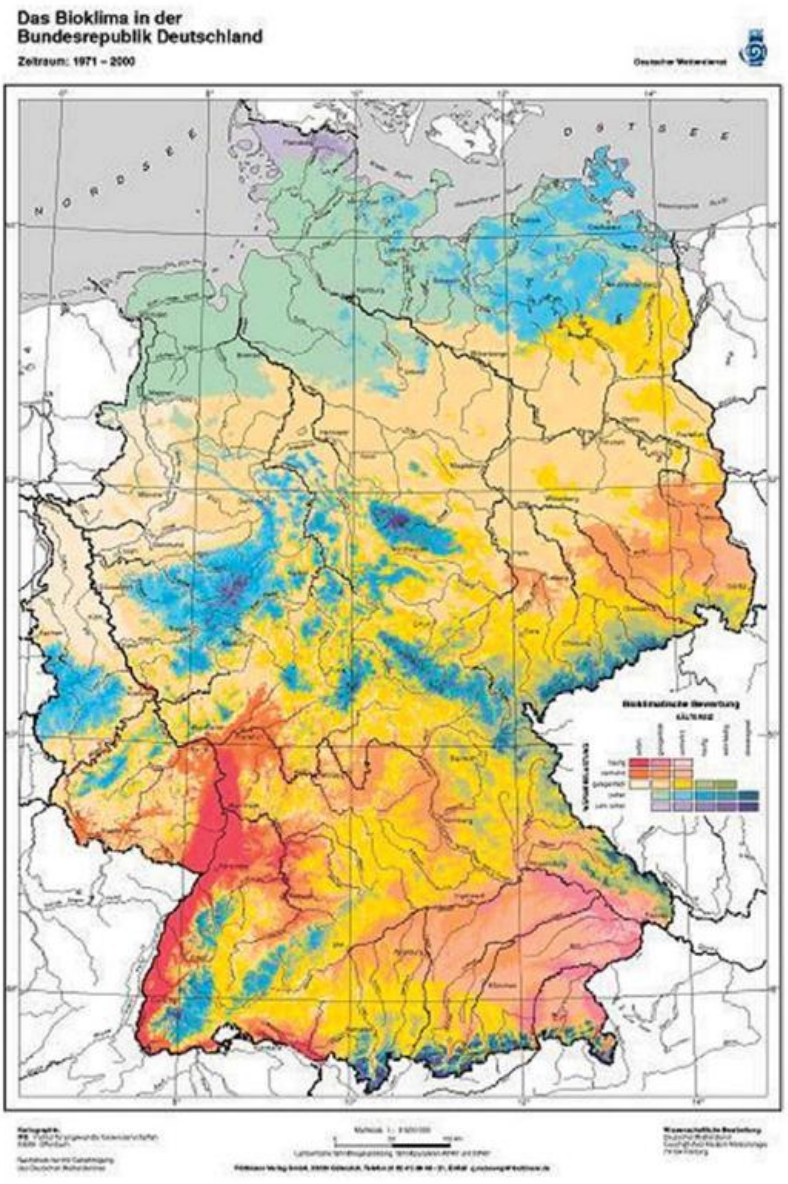


Abb. 6-6: Bioklimakarte.

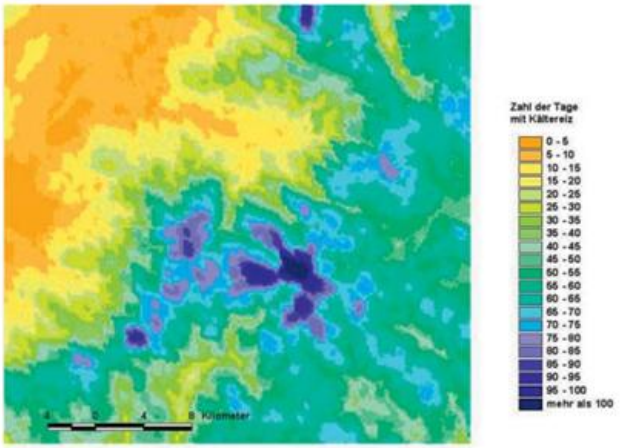


Abb. 6-7: Beispiel einer höher aufgelösten regionalen Bioklimakarte.

In der Bioklimakarte von Deutschland (JENDRITZKY et al. 2003) ist als Überlagerung im 1-km-Raster dargestellt, wie häufig Wärmebelastung und Kältereiz im langjährigen Jahresmittel trotz angepasster Bekleidung zu erwarten ist (Abb. 6-6). Dabei wurden die 30-jährigen Mess- und Beobachtungsdaten der deutschen Wetter-Stationen mit dem Klima-Michel-Modell analysiert und auf Tage mit Wärmebelastung und Kältereiz hin ausgewertet. Die Übertragung von diesen Punktdaten in den Raum erfolgte mit einem statistischen Modell, das die thermischen Bedingungen in Beziehung setzt zu den natürlichen, klimatologischen Wirkungsfaktoren geographische Breite, Kontinentalität/Maritimität, Höhe über NN und Orographie. Diese Klimafaktoren müssen als fest vorgegeben hingenommen werden und können durch Raumplanung nicht verändert werden. Somit zeigt die Bioklimakarte von Deutschland die klimatologische Hintergrundbelastung der aktuellen thermischen Bedingungen.

Die höher aufgelösten regionalen Bioklimakarten (Auflösung 50 bis 250 m) werden analog zur Bioklimakarte von Deutschland erstellt (Abb. 6-7). Es wird jedoch neben den genannten Klimafaktoren auch eine einfache Landnutzungsklassifikation berücksichtigt, die im Wesentlichen zwischen Wald, Freifläche, Bebauung und Wasser unterscheidet. In den Karten wird die Verteilung der Tage mit Wärmebelastung und mit Kältereiz als Jahresmittelwert oder eine Überlagerung beider dargestellt (REKLIP 1995).

Mit dem Klimafaktor Flächennutzung bietet sich dem Planer die Möglichkeit, das Klima und damit auch das Bioklima aktiv und zu Gunsten der Menschen zu gestalten. Angesprochen ist hier insbesondere die Stadtplanung, die insbesondere aufgrund der zu erwartenden Klimaänderung, Ausgleichsmaß-

nahmen aufzeigen muss. Mit hoch auflösenden Stadtbioklimakarten (siehe Abb. 1-13 im Kapitel 1, Thermische Umweltbedingungen) kann der DWD die Planung frühzeitig unterstützen.

7 Informationen zum Kurklima

In vielen Gebieten sind Natur und Klima schon immer die Grundlage für eine gute Erholung. Gesundheitsförderlich - und damit therapeutisch anwendbar - ist Klima insbesondere dann, wenn (im Idealfall) keine belastenden Faktoren wie z. B. Wärmebelastung oder Schadstoffanreicherungen in der Luft vorkommen und außerdem eine stimulierende Wirkung durch Reize gegeben ist, die bei dosierter Anwendung Anpassungsreaktionen im Organismus auslösen (z. B. Abkühlungsreize, Sonnen- und UV-Strahlung). Dieses Klima kann zur Vorbeugung von Erkrankungen, zur Verminderung bestehender Beschwerden sowie bei chronischen Krankheiten als Heilmittel eingesetzt werden.

Eine der wirksamsten Formen der Klimatherapie ist die Heilklima-Wanderung (Terrainkur): In Kombination mit Bewegung setzt man sich gezielt mit den Klimareizen auseinander. Durch das Gehen im Gelände werden Ausdauer und Koordinationsfähigkeit trainiert. Die sich ständig ändernden Klimareize stärken die Adaptationsmechanismen im allgemeinen, leichte Kältereize fördern die Abhärtung im speziellen.

Mit dem Kurklima-Modell bietet der Deutsche Wetterdienst allen Orten seine Unterstützung an, die therapeutischen Möglichkeiten des Klimas ihrer Region optimal zu nutzen. Anhand der Bioklimakarte einer Region lässt sich festlegen, welche Teilgebiete im Hinblick auf die thermischen Umweltbedingungen klimatherapeutisch besonders geeignet sind (Abb. 6-8).

Speziell für das Heilklima-Wandern errichtete Wege erleichtern eine Dosierung der Reize und sind damit ein wichtiger Baustein des therapeutischen Erfolgs. Auch hier ist es u. a. besonders die Bioklimakarte, die konkrete Hinweise liefert, wo Wege unter klimatherapeutischen Gesichtspunkten optimal erschlossen werden können.

Anforderungsprofile der einzelnen Heilklima-Wanderwege (Abb. 6-9) sowie eine Bewertung der Wege nach leistungsphysiologischen und bioklimatischen Gesichtspunkten ermöglichen eine gezielte Auswahl eines entsprechend der persönlichen Leistungsfähigkeit geeigneten Wanderweges.

Die Beratungssoftware des Kurklima-Modells nutzt die laufenden Messwerte der automatischen Wetterstation vor Ort. Interaktiv wird auf verschiedenen Bildschirmseiten damit eine aktuelle und individuelle Beratung zur Terrainkur angeboten (Abb. 6-10).

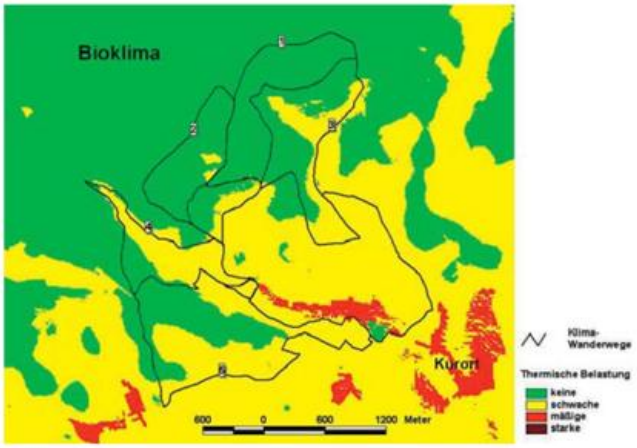


Abb. 6-8: Bioklimakarte mit Klimawanderwegen.

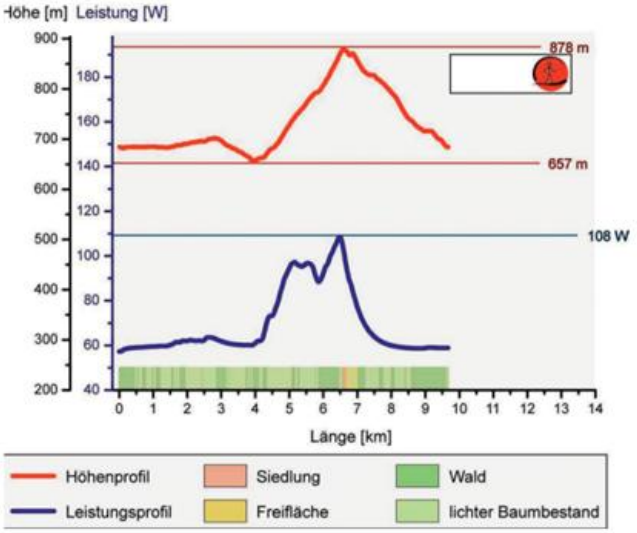


Abb. 6-9: Höhenanforderungsprofil eines Klimawanderweges.



Abb. 6-10: Beratungssoftware des Kurklima-Modells des DWD.

Literatur

BECKER, P., 2005: Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes: *Notfallvorsorge, Zeitschrift für Katastrophenmanagement und Humanitäre Hilfe*, 22-23.

CASPAR, W., 1962: Die Schneedecke in der Bundesrepublik Deutschland. *Deutscher Wetterdienst*, Zentralamt, Offenbach, Selbstverlag.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Summary for Policymakers, http://www.ipcc.ch/SPM13apr07.pdf.

JENDRITZKY, G., GRÄTZ, A., LASCHEWSKI, G., SCHEID, G., 2003: Das Bioklima in Deutschland. Bioklimakarte mit Begleittext und Informationen zur Wohnortwahl. 3. vollständig überarbeitete Auflage. *Flöttman Verlag*, Gütersloh.

KAUFMAN ,Y.J., TANRÉ, D., BOUCHER, O., 2002: A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature* **419**, 215-223.

KOEPKE, P., HESS, M., SCHULT, I., SHETTLE, E.P., 1997: Global Aerosol Data Set. Max-Planck-Institut für Meteorologie, *Report* **243**, 44 S.

KÖPKE, P., DE BAKER, H., BAUIS, A., CURYLO, A., EERME, K., FEISTER, U., JOHNSEN, B., JUNK, J., KAZANTZIDIS, A., KRZYSCIN, J., LINDFORS, A., OLSETH, J.A., DEN OUTER, P., PRIBULLOVA, A., SCHMALWIESER, A.W., SLAPER, H., STAIGER, H., VERDEBOUT, J., VUILLEUMIER, L., WEIHS, P., 2006: Modeling solar UV radiation in the past: Comparison of algorithms and input data. *Proceedings of SPIE* Vol. **6362**.

KOPPE, C., 2005: Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **226**, Offenbach am Main.

LAPETA, B., SCHWANDER, H., KOEPKE, P., 2001: Adaption of Radiative Transfer Modelling to Simulate UV Radiation on Top of a Mountain, in IRS 2000: Current Problems on Atmospheric Radiation, *Deepack Publ.*, Hampton Virginia, 373-376.

REKLIP, Trinationale Arbeitsgemeinschaft Regio-Klima-Projekt (Hrsg.), 1995: Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd. Verlagsgemeinschaft vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich; IFG Institut für angewandte Geowissenschaften, Offenbach; *Editions Coprür*, Strasbourg.

STAIGER, H., KOEPKE, P., 2005: UV Index forecasting on a global scale. *Meteorol. Z.*, **14** (2), 1-12.

SCHWANDER, H., KAIFEL, A., RUGGABER, A., KOEPKE, P., 2001: Spectral radiative-transfer modeling with minimized computation time by use of a neural-network technique. *Appl. Optics* **40**, 331-335.

TANSKANEN, A., 2004: Lambertian Surface Albedo Climatology at 360 nm from TOMS Data Using Moving Time-Window Technique. In: Proceedings of the XX Quadrennial Ozone Symposium, 1-8 June 2004, Kos, Greece.

TORRES, O., BHARTIA, P.K., HERMAN, J.R., SINYUK, A., GINOUX, P., HOLBEIN B., 2002: A Long-Term Record of Aerosol Optical Depth from TOMS Observations and Comparison to AERONET Measurements. *J. Atmos. Sciences* **59**, 398-413.

VANICEK, K., FREIT., LITYNSKA Z., SCHMALWIESER, A., 2000: UV-Index for the Public. A guide for publication and interpretation of solar UV Index forecasts for the public prepared by the Working Group 4 of the COST-713 Action "UVB Forecasting". COST-713 Action, European Commission, Luxembourg: *Office for Official Publications of the European Communities*, 27 S.

WHO, 2002: Global solar UV index: a practical guide. A joint recommendation of the World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations Environmental Programme, and the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *World Health Organization*, Geneva.

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 148-156 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

P. BECKER, K. BUCHER, G. JENDRITZKY, U. KAMINSKI, C. KOPPE, G. LASCHEWSKI

7 Gesundheitsrisiken durch Klimawandel

Health risks due to climate change

Zusammenfassung
Die anthropogene Beeinflussung des Klimas zeigt auch in Deutschland bereits Auswirkungen. Mit dem Klimawandel sind zunehmende Gesundheitsrisiken verbunden. Eine sehr lückenhafte Datenlage und vielfältige Unsicherheiten erschweren deren Bestandsaufnahme und Zukunftsprojektionen und erlauben gegenwärtig nur eine überwiegend qualitative Darstellung der Risiken. Das größte Risikopotential wird thermischen Einflüssen zugemessen. Die erwartete Zunahme der Häufigkeit und/oder Intensität von Hitzewellen kann zu einer großen Anzahl von thermisch bedingten Todesfällen führen. Weitere Gesundheitsgefahren können sich ergeben durch Komponenten des Wasserkreislaufs (insbesondere durch Überschwemmungen als Folge der Zunahme winterlicher Starkniederschläge), durch Ozon (sowohl durch eine verzögerte Erholung der stratosphärischen Ozonschicht als auch durch die Möglichkeit für verstärktes Auftreten von Sommersmog), durch Vektoren (durch verbesserte Bedingungen für die Verbreitung von Infektionskrankheiten) und durch Pollen (in Folge von Milieuänderungen bei existierenden Arten und das Auftreten von Neophyten). Möglichkeiten zur Minimierung der negativen Gesundheitsfolgen des Klimawandels durch Anpassungsstrategien werden diskutiert.

Abstract
Anthropogenic influences on climate are already having effects in Germany. Climate change is associated with increasing health risks. Large data gaps and several uncertainties make it difficult to specify the actual state and future projections, and currently allow only a mainly qualitative description of the risks. The greatest potential risk is attributed to thermal influences. The expected increase in the frequency and/or intensity of heat waves can result in a great number of thermally-related deaths. Further health risks can arise from components of the water cycle (especially from flooding caused by the increased frequency of heavy precipitation events in winter), from ozone (both by a delay in the recovery of the stratospheric ozone layer and by the possibility of an increased frequency of summer smog events), from vectors (due to better conditions for the prevalence of infectious diseases) and from pollen (due to changes in the milieu of existing species and the occurrence of new species). Possibilities for minimising the negative health impacts of climate change by means of adaptation strategies are under discussion.

1 Einführung

Der Klimawandel ist eine globale Erscheinung mit räumlich und zeitlich unterschiedlicher Ausprägung. Inzwischen gelten seine anthropogenen Ursachen - die Zunahme von Treibhausgasen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, Waldrodung und Landwirtschaft - als weitestgehend anerkannt. Die Klimaänderungen und deren Auswirkungen sind auch in Deutschland bereits spürbar. Dazu zählen ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur, das häufigere Auftreten von extrem heißen und trockenen Sommern, heftigere Stürme und mehr Starkniederschläge, besonders im Westen Deutschlands. Mit dem Klimawandel sind nicht nur große wirtschaftliche Schäden durch die Zunahme der Naturkatastrophen verbunden (Abb. 7-1), sondern auch zunehmende Gesundheitsrisiken (Abb. 7-2). Es stellt sich die Frage nach möglichen Anpassungsstrategien zum Schutz von Leben und Gesundheit der Bevölkerung. Die Entwicklung und Auswahl der notwendigen Maßnahmen zur Anpassung sowie die Zügigkeit deren Umsetzung sollten entscheidend von der Geschwindigkeit und dem Ausmaß des Klimawandels mitbestimmt werden.

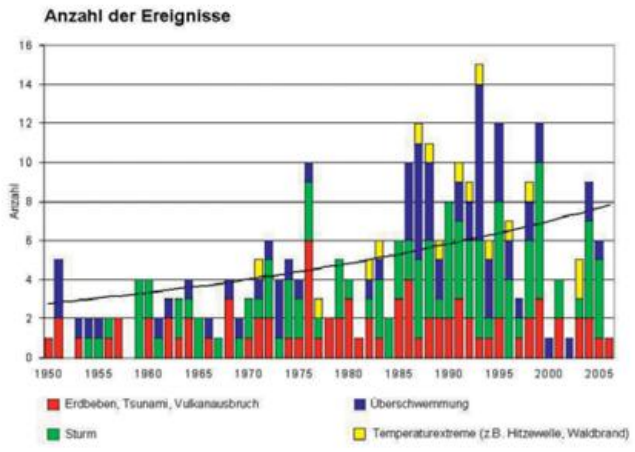


Abb. 7-1: Anzahl der großen Naturkatastrophen 1950-2006 (Münchner Rückversicherung, Topics Geo 2006).

Im Vergleich zu den allmählichen Klimaänderungen ist das Gefährdungspotential extremer Wetterereignisse wie Hitzewellen, Starkniederschläge oder Stürme oft noch wesentlich größer. Die Aussagen zur Häufigkeit und Stärke künftiger Extremereignisse sind jedoch mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden. Tab. 7-1 enthält eine Einschätzung des Vertrauensniveaus der beobachteten Änderungen von extremen Wetter- und Klimaereignissen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts sowie der projizierten Änderungen im 21. Jahrhundert. Diese Einschätzungen beruhen auf Beobachtungs- und Modellstudien sowie der physikalischen

Plausibilität der Modellrechnungen der zukünftigen Entwicklung für alle vom Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC 2007) allgemein verwendeten Szenarien und basieren auf Expertenurteilen. Auch bei der Abschätzung der Gesundheitsfolgen des Klimawandels ist eine Akkumulation von Unsicherheiten unvermeidbar. Neben den wissenschaftlichen Unsicherheiten der Zukunftsprojektionen bestehen Unsicherheiten aus den unvollständigen Kenntnissen über die Zusammenhänge von Gesundheit und Klima.

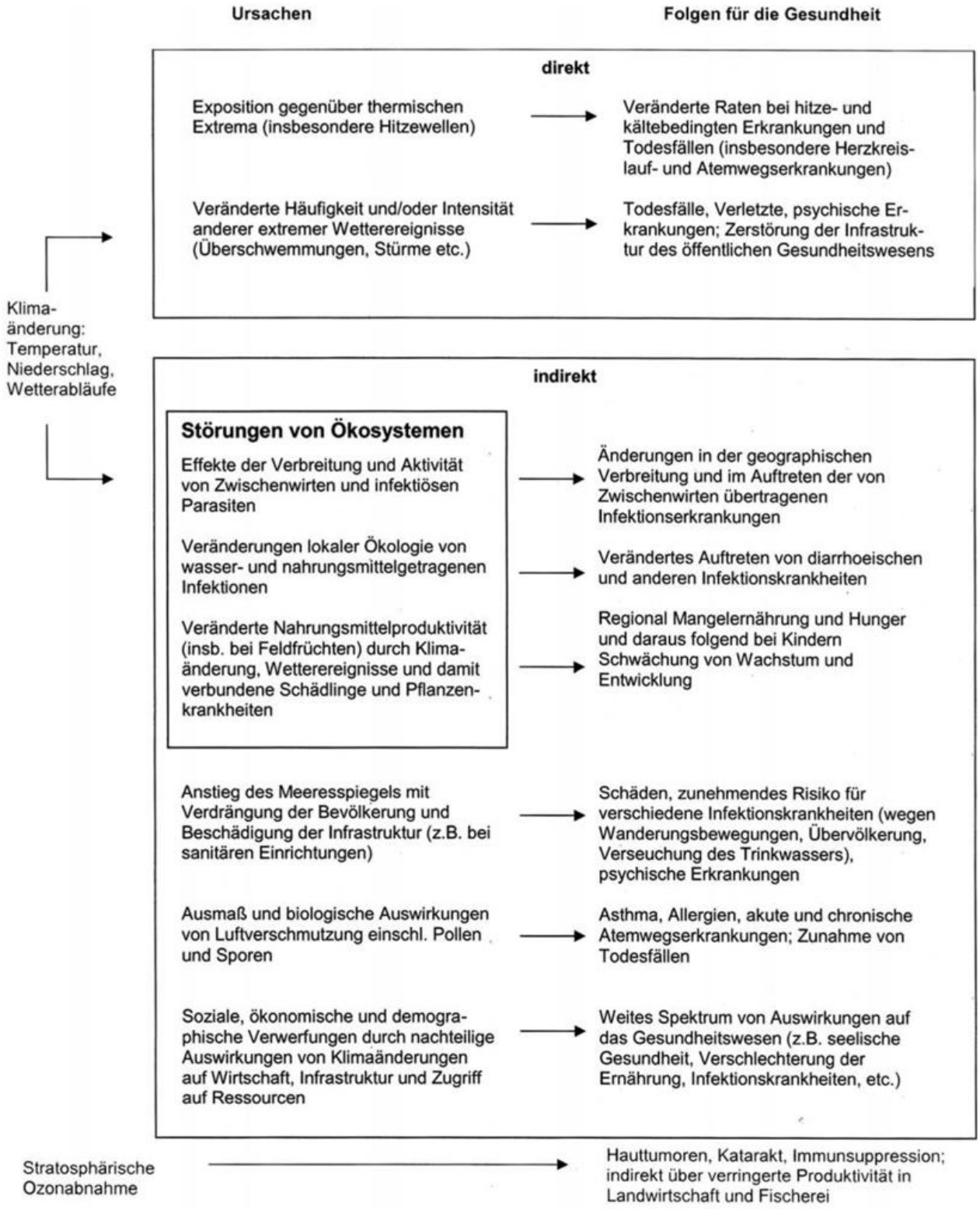


Abb. 7-2: Wirkungspfade von Klimaänderungen auf die Gesundheit des Menschen (nach WHO 1996).

Phänomen und Richtung des Trends	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Trends im 20. Jahrhundert (typischerweise nach 1960)	Wahrscheinlichkeit für zukünftige Trends basierend auf Projektionen für das 21. Jahrhundert (SRES Szenarien)
Wärmer und weniger kalte Tage und Nächte über den meisten Landmassen	**sehr wahrscheinlich** (> 90 %) Abnahme der Häufigkeit der 10 % kältesten Tage und Nächte	**nahezu sicher** (> 99 %) Erwärmung der extremsten Tage und Nächte jedes Jahres
Wärmer und mehr heiße Tage und Nächte über den meisten Landmassen	**sehr wahrscheinlich** (> 90 %) Zunahme der Häufigkeit der 10 % wärmsten Tage und Nächte	**nahezu sicher** (>99 %) Erwärmung der extremsten Tage und Nächte jedes Jahres
Hitzewellen: Zunahme der Häufigkeit über den meisten Landmassen	**wahrscheinlich** (> 66 %)	**sehr wahrscheinlich** (> 90 %)
Starkniederschlagsereignisse: Zunahme der Häufigkeit (oder des Anteils am Gesamtniederschlag) über den meisten Landmassen	**wahrscheinlich** (> 66 %)	**sehr wahrscheinlich** (> 99 %)
Dürren: Zunahme der betroffenen Gebiete	**wahrscheinlich** (> 66 %) (> 66 %) in vielen Gebieten seit 1970	**wahrscheinlich** (> 66 %)

Tab. 7-1: Beobachtete und projizierte Änderungen extremer Wetter- und Klimaereignisse (Auszug, IPCC 2007).

Die Klimafolgenforschung im Gesundheitsbereich ist in ihrem Entwicklungsstand bei weitem noch nicht so fortgeschritten, wie die Forschung zum Klimawandel. Momentan erschwert eine insgesamt sehr lückenhafte Datenlage bereits die Bestandsaufnahme der aktuellen Situation. In vielen Bereichen muss daher die Beschreibung der Zusammenhänge von Gesundheit und Klima überwiegend qualitativ bleiben bis verlässliche Daten vorliegen. Dennoch ist eine Identifizierung der möglichen Gesundheitsgefahren durch den Klimawandel dringend geboten, um in weiteren Schritten auch zunehmend deren quantitative Beschreibung voranzutreiben und insbesondere die rechtzeitige Entwicklung, Erprobung und Etablierung von geeigneten Anpassungsmaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung zu ermöglichen.

Die Gesundheitsfolgen des Klimawandels und die Umsetzung von Anpassungsstrategien werden neben hochgradiger Komplexität der beteiligten Systeme auch mitbestimmt durch die zukünftige politische, sozioökonomische, demographische und technologische Entwicklung, welche durch eine inhärente Unberechenbarkeit gekennzeichnet ist. Daraus ergeben sich zusätzliche soziale und ökonomische Unsicherheiten, deren Quantifizierung ebenfalls noch wenig entwickelt ist.

Der gegenwärtige Stand der Forschung und die genannten Unsicherheiten widerspiegeln sich in diesem Überschneidungsbereich zwischen Natur- und Gesellschaftswissenschaften in einer überwiegend qualitativen Darstellung der Risiken.

2 Risiken durch thermische Einflüsse

Gesundheitliche Belastungen des Menschen durch Hitze oder Kälte ergeben sich aus dem Zusammenwirken von Temperatur, Strahlung, Wind und Feuchte und können sich als thermisch bedingte Morbidität und Mortalität sowie Einschränkungen von Leistungsfähigkeit und Wohlbefinden auswirken (siehe auch Artikel „Thermische Umweltbedingungen", Kapitel 1 in diesem Heft). Die enge Kopplung der menschlichen Gesundheit an die atmosphärische Umwelt resultiert aus der Notwendigkeit, trotz ständigen Wärmeaustauschs mit der Umgebung die Körpertemperatur in relativ engen Grenzen konstant zu halten. Die Thermoregulation beansprucht bei steigender Belastung durch Hitze oder Kälte zunehmend das Herz-Kreislaufsystem und kann wegen ihrer hohen Priorität im menschlichen Körper auch zur Verschlechterung nicht direkt thermisch bedingter Erkrankungen beitragen (PARSONS 2003). Einem besonderen Risiko für negative Gesundheitsfolgen unterliegen eingeschränkt anpassungsfähige Menschen auf Grund von Alter (z. B. Kleinkinder, ältere Menschen), Erkrankungen (z. B. chronische Atemwegs- und Herz-Kreislauferkrankungen, Demenz), physischer Belastung (z. B. Überanstrengung, Schwangerschaft) und Medikamenteneinnahme.

Vom Klimaelement Temperatur liegen lange Beobachtungsreihen vor. Diese lassen die Schlussfolgerung zu, dass die globale Jahresmitteltemperatur der Erdoberfläche in den letzten 100 Jahren um etwa 0,74 °C (± 0,18 °C) angestiegen ist (IPCC 2007). Die Erwärmungsrate für die letzten 50 Jahre ist nahezu doppelt so groß wie für die vergangenen 100 Jahre. Die Minimalwerte der Nachttemperatur über den Landoberflächen stiegen dabei deutlich stärker an als die Tageshöchsttemperaturen. Elf der letzten zwölf Jahre (1995-2005) waren global die wärmsten Jahre seit Beginn der systematischen Beobachtungen in 1850. In Deutschland wurde in den letzten 100 Jahren ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 0,8 °C verzeichnet. Für die jüngere Vergangenheit zeigt sich anhand der Datenreihe auch in allen Jahreszeiten eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten extrem warmer Tage und die Abnahme kalter Tage. Dies gilt besonders für den Winter und in Süddeutschland. Auffällig ist der verbreitete, jedoch nicht flächendeckende Trend zu heißeren Sommern. Für die zukünftige Entwicklung wird abhängig vom verwendeten Klimamodell und

Emissionsszenario ein Anstieg der Mitteltemperatur in Deutschland erwartet (z. B. bis 2100 von 1 °C bis zu 4 °C). Die Mortalität zeigt in Mitteleuropa einen deutlichen Jahresgang mit Maximum im Winter und Minimum im Sommer, wobei die Zahl der Todesfälle jeweils mit steigender thermischer Belastung zunimmt. Für die zukünftigen thermischen Belastungen wird es als sehr wahrscheinlich eingeschätzt, dass es häufiger Hitzewellen geben wird und seltener Frosttage (Tab. 7-1).

2.1 Winter

Im Winter ist der Mensch durch den überwiegenden Aufenthalt in geheizten Räumen von den thermischen Außenbedingungen stärker abgekoppelt als im Sommer. Daher spiegelt die erhöhte Mortalität im Winter wahrscheinlich die höhere Prävalenz von Infektionskrankheiten wider. Mögliche Wirkungszusammenhänge zum Kältestress bedürfen noch der Klärung. Folglich sind auch Schlussfolgerungen über eine Reduktion der Wintermortalität durch mildere Winter im Zusammenhang mit dem Klimawandel sehr unsicher. Auch sozioökonomische, technische und infrastrukturelle Einflüsse spielen eine Rolle. Im Winter ist die Mortalität bisher im europaweiten Vergleich in Regionen mit milderen Wintern höher als in Regionen mit kälteren Wintern, was u. a. mit Unterschieden in den Wohnbedingungen und im Heizverhalten erklärt wird. In Deutschland gab es in den vergangenen Jahrzehnten einen Rückgang der Wintermortalität der u. a. auf bessere medizinische Versorgung zurückgeführt wird.

2.2 Sommer

Abb. 7-3 zeigt beispielhaft erwartete Änderungen des Auftretens von Tagen mit starker bis extremer Wärmebelastung in Baden-Württemberg. Insbesondere lang andauernde starke Wärmebelastung kann zu einer großen Anzahl von thermisch bedingten Todesfällen führen, wie z. B. die Hitzewelle im Jahr 2003 zeigte. Im Artikel „Das Medizin-Meteorologische Informationsangebot für den Gesundheitssektor und die Öffentlichkeit" (Kapitel 6 in diesem Heft) sind Details dazu dargestellt sowie auch zu Möglichkeiten, die negativen gesundheitlichen Auswirkungen zu mildern.

3 Risiken durch Komponenten des Wasserkreislaufs

Der Wasserkreislauf mit seinen Komponenten Niederschlag, Evapotranspiration und Abfluss ist als Teil des Klimasystems eng dem Klimawandel verbunden. Mit der Tendenz zur globalen Erwärmung wird eine Intensivierung des hydrologischen Kreislaufs erwartet, da wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann.

Das Klimaelement Niederschlag zeigt im Zeitraum des letzten Jahrhunderts für die meisten Regionen der mittleren und hohen geographischen Breiten eine Zunahme der mittleren Werte. In Deutschland zeigt sich im Winter auch ein Trend zu einer zunehmenden Variabilität, d. h. die Tendenz zu einem wirklich extremeren Klima mit einer deutlichen Zunahme extrem hoher Niederschlagssummen. Der Sommer weist einen Trend zu einer verringerten Variabilität auf; extrem hohe monatliche und saisonale Niederschlagssummen sind seltener geworden. Es gilt als wahrscheinlich, dass sich die Entwicklung zu winterlichen Starkniederschlägen und sommerlicher Trockenheit in Zukunft fortsetzen wird, wobei die regionale Differenzierung noch mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Aus Starkniederschlägen können Überschwemmungen entstehen, wenn dies durch die Einzugsgebietsfaktoren

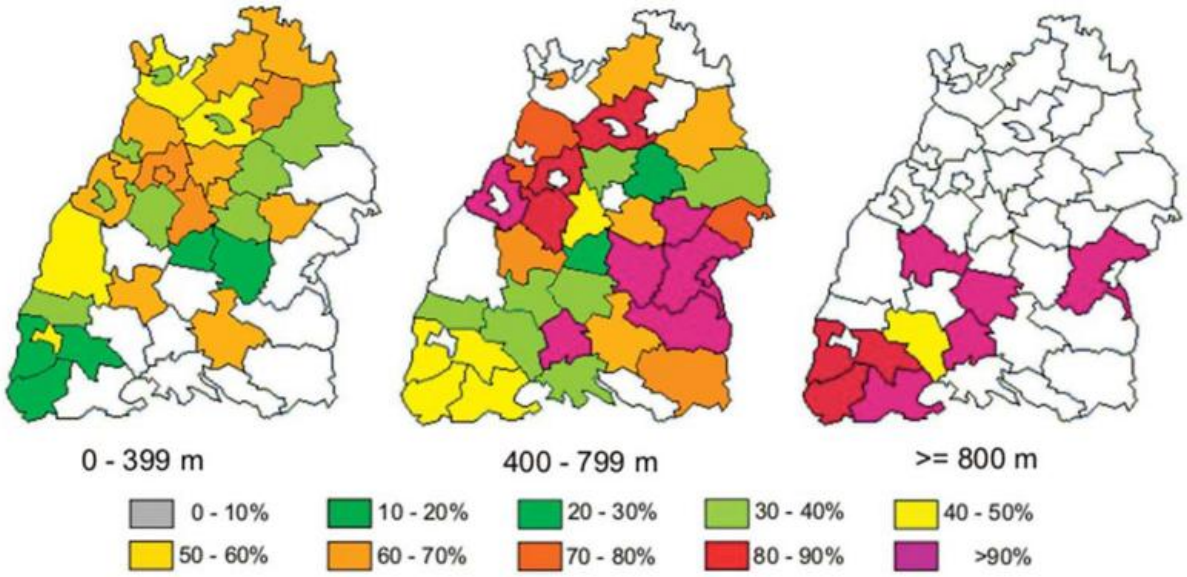


Abb. 7-3: Änderung der Auftretenshäufigkeit von Tagen mit „starker" bis „extremer Wärmebelastung" für 2001-2055 relativ zu 1951-2000 in Baden-Württemberg (Koppe 2005).

wie Geologie, Hangneigung, Landnutzung und Versiegelungsgrad begünstigt wird. Für Europa geht man von einer Zunahme psychischer Störungen als zum Teil lang anhaltende negative Gesundheitsfolge von Überschwemmungen aus, welche neben den offensichtlichen akuten Gefährdungen der Gesundheit durch Ertrinken und Verletzungen besonders weit verbreitet ist (DANIEL et al. 2002). Weitere gesundheitliche Auswirkungen von Überschwemmungen könnten sich längerfristig u. a. durch Kontamination der Böden mit Schwermetallen in den Überschwemmungsgebieten ergeben. Die erwartete Zunahme der Sommertrockenheit kann negative Auswirkungen auf die Trinkwassergewinnung haben. Auch die Möglichkeit kurzfristiger Gesundheitsgefahren durch die Zunahme des Waldbrandrisikos wächst.

4 Risiken durch Ozon

4.1 Stratosphärisches Ozon

Die stratosphärische Ozonschicht enthält etwa 90 Prozent des atmosphärischen Ozons und schützt vor den schädlichen Wirkungen der solaren UV-Strahlung. Details dazu sind dem Artikel „Solare UV-Strahlung und ihre Wirkung auf den Menschen" (Kapitel 2 in diesem Heft) zu entnehmen. Dort werden auch bisher beobachtete und zukünftig erwartete Trends dargestellt.

4.2 Troposphärisches und bodennahes Ozon

Etwa 10 Prozent des atmosphärischen Ozons befinden sich in der Troposphäre und tragen zum Treibhauseffekt bei. Bodennahes Ozon dient als Nachweissubstanz für Photooxidantien (Sommersmog). Als Reaktion auf Minderungsmaßnahmen von Ozon bildenden Substanzen (Stickoxide und flüchtige organische Kohlenwasserstoffe) zeigt die mittlere Ozonkonzentration in der Troposphäre nach einem Anstieg bis Ende der Achtziger Jahre gegenwärtig eher eine Stagnation. Für das bodennahe Ozon wurde bisher an den meisten Messstationen keine Veränderung der monatlichen Spitzenkonzentrationen festgestellt.

Bodennah vorkommendes Ozon kann negative gesundheitliche Wirkungen haben. Etwa 10 bis 15 % der Bevölkerung reagieren besonders empfindlich auf Ozon. Beeinträchtigungen der Gesundheit sind um so eher zu erwarten, je höher die Ozonkonzentration der inhalierten Luft ist, je länger man dem Ozon ausgesetzt ist, und je höher das Atemminutenvolumen während der Exposition ist. Höhere Ozonkonzentrationen treten besonders während sommerlicher Schönwetterperioden mit andauernd hohen Temperaturen auf, welche die Entstehung von Ozon aus anthropogen erzeugten Vorläufersubstanzen begünstigen. Als Nebenprodukt der atmosphärischen Ozonbildung entstehen weitere Substanzen (z. B. Peroxiacetylnitrat und Formaldehyd), die den überwiegenden Teil der Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute des Nasen-Rachen-Raums auslösen. Ozon dringt auf Grund seiner geringen Wasserlöslichkeit weiter in die Lunge ein, wo es zur Schädigung der Zellmembran mit damit verbundenen entzündlichen Prozessen kommen kann. Obwohl Ozon selbst kein Allergen ist, können gleichzeitig anwesende chemische oder biologische Allergene tiefer in das geschädigte Gewebe eindringen und zu der in der Literatur beschriebenen allergiefördernden Wirkung von Ozon beitragen.

Mit dem Klimawandel wird in Mitteleuropa ein verstärktes Auftreten von sehr warmen Sommern und eine Zunahme von Hitzwellen erwartet. Besonders im Umfeld der Städte und Ballungsräume wird es maßgeblich von der Emission der Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung abhängen, ob das zwangsläufig auch zu einem häufigeren Auftreten von Sommersmog mit den beschriebenen Gesundheitsrisiken führen wird.

5 Risiken durch Vektoren

Die Übertragung von Infektionskrankheiten durch Vektoren (Zwischenwirte) hängt in vielfältiger Weise vom Klima ab. Daher sind auf diesem Weg mittelbare Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit möglich. Klimatische Umweltfaktoren spielen eine wichtige Rolle für

- die Verbreitung der Vektoren,
- die Populationsdynamik der Vektoren,
- die Entwicklungsgeschwindigkeit der Pathogene im Vektor.

Neben geeigneten klimatischen Bedingungen sind das Vorhandensein infizierter Reservoirwirte und kompetenter Vektoren (Insekten [Stechmücken, Läuse, Flöhe], Spinnentiere [Zecken], Nagetiere [Ratten, Mäuse]) entscheidend für die Übertragung von Infektionskrankheiten (MAIER et al. 2003).

5.1 Zecken

Unter den vektorübertragenen Krankheiten steht in Deutschland die Gefahr der durch Zecken übertragen Krankheiten an erster Stelle. Zecken übertragen am häufigsten die Borreliose (jährliche Inzidenzrate von 200 00 bis 60 000 Fällen mit hoher Dunkelziffer) und die **Früh**sommer-**M**eningo**e**nzephalitis FSME (FAULDE und HOFFMANN 2001), welche schwerpunktmäßig in Süddeutschland und Österreich auftritt, aber regional begrenzt auch in Polen, Tschechien, der Slowakei und angrenzenden Ländern, sowie in den neuen Bundesländern (grenznahe Bereiche).

In den Endemiegebieten Deutschlands kann jede 20. bis 50. Zecke FSME übertragen und fast jede dritte Zecke Borreliose (MAIER et al. 2003). Einem Risiko

für Zeckenbisse und damit auch der Infizierung unterliegen alle Personen, die in freier Natur oder im Garten in Berührung mit längeren Grasbüscheln oder halbhohem Gestrüpp kommen.

Die Verbreitung und Aktivität der Zecken werden stark durch die vorherrschenden Temperatur- und Feuchtebedingungen beeinflusst. Das Verbreitungsgebiet der Zecken erstreckt sich gegenwärtig vom Mittelmeerraum bis Süd-Skandinavien. Es wird begrenzt durch die Länge der Übergangsjahreszeiten (maximale Zeckenaktivität im Mai und Juni sowie im September und Oktober) und durch kalte Wintertemperaturen (Zecken können Frost bis etwa –7 °C überleben). Die Überlebensmöglichkeiten der Zecken nehmen bei Trockenheit stark ab. Durch den Klimawandel könnte sich das Verbreitungsgebiet der Zecken verändern. Bereits beobachtet wurde eine Ausdehnung in höhere Breiten (Schweden), in größere Höhen (Tschechische Republik) sowie ein Zurückweichen der südlichen Grenze des Verbreitungsgebietes (Ungarn, Kroatien, Slowenien). Zusätzlich führt eine Änderung des Klimas mit milderen Wintern zu einer höheren Überlebensrate von Zecken und kleinen Waldnagern, den natürlichen Wirten der Erreger. Damit stehen in den darauf folgenden Jahren bereits zu Beginn des Übertragungszyklus größere Zecken- und Nagerpopulationen zur Verfügung. Folglich könnte der Klimawandel zusammen mit indirekten klimatischen Einflüssen über Änderungen der Vegetation, des Reservoirs und des Freizeitverhaltens des Menschen eine Zunahme des potentiellen Risikos für die Übertragung von Infektionskrankheiten durch Zecken bedingen.

5.2 Stechmücken

Die wichtigste durch Stechmücken übertragene Krankheit ist die Malaria. Die potentiellen Vektoren (Anopheles-Mücken) existieren auch in Deutschland, momentan jedoch ohne endemische Malaria (MAIER et al. 2003). Der Malaria sind klimatische Grenzen in ihrer Verbreitung gesetzt, die jedoch durch eine Klimaänderung ausgedehnt werden können. Die Vektoren treten hauptsächlich in der warmen Jahreszeit auf und sind ab 8 bis 10 °C biologisch aktiv. Jedoch nehmen ihre Überlebensmöglichkeiten bei Trockenheit stark ab. Für die Übertragung der Pathogene sind etwa 15 bis 19 °C erforderlich. Die Gefahr steigt rapide, wenn die Tages- und Nachttemperaturen zwei Wochen lang diese Temperaturen nicht unterschreiten. Maximaltemperaturen von über 33 °C sind für die Pathogene tödlich. Bis nach dem zweiten Weltkrieg war die Malaria in Deutschland verbreitet. Gegenwärtig gibt es jährlich etwa 1000 importierte Malariafälle durch Reisende. Wie ein Präzedenzfall aus Berlin zeigt, ist in direkter Nachbarschaft importierter Malariafälle im Sommer bei entsprechenden Temperaturverhältnissen in Einzelfällen eine autochthone Übertragung von Malaria bereits jetzt möglich.
Integrierte mathematische Modelle, die Klimaänderungsszenarien mit Modellen der Vektoraktivität verbinden, berechnen für Mitteleuropa ein mögliches Wiederauftreten von Malaria (WHO 1996). Wegen der Dominanz weiterer, nicht-klimatischer Einflüsse bewerten andere Quellen die Gefahr einer Etablierung jedoch als eher gering, während Einzelfälle und lokale Ausbrüche durchaus möglich sind.

Stechmücken übertragen auch die fieberhafte Virus-Erkrankung Dengue, die bisher nur in den Tropen und Subtropen endemisch ist. Der Vektor, die asiatische Tigermücke, scheint jedoch in Europa unaufhaltsam auf dem Vormarsch zu sein. Neben Italien, der Süd-Schweiz, dem Balkan, Griechenland, Frankreich und Belgien tritt die Tigermücke jetzt auch in Spanien auf, wobei Krankheitsübertragungen in Europa bisher nicht bekannt geworden sind. Die Tigermücken stechen vorwiegend tagsüber und am frühen Abend. In der Nähe der Brutplätze (kleinste Ansammlungen von sauberem Wasser) besteht für alle Personen ein erhöhtes Risiko für Mückenstiche. Die Minimumtemperatur für die biologische Aktivität der Vektoren beträgt 6 bis 10 °C. Die Überlebensmöglichkeiten der Mücken nehmen bei Trockenheit stark ab. Andererseits können sich die Stechmücken bei günstigen, feuchten Brutplatzbedingungen explosionsartig vermehren (z. B. im Rheintal nach Hochwasser oder starken Regenfällen). Für die Übertragung der Viren sind etwa 12 °C erforderlich. Mit der erwarteten Klimaerwärmung wird sich das Verbreitungsgebiet der Tigermücke weiter ausdehnen. Zudem zeigten Labortests einen signifikanten Anstieg der Vermehrungsrate der Mücken mit steigender Temperatur. Die Projektionen über potentielle Degue-Fieber-Epidemien auf der Basis von Rechnungen mit globalen Klimamodellen weisen jedoch noch starke Defizite auf. Möglicherweise dominieren nicht-klimatische Faktoren.

5.3 Sandmücken

Sandmücken können Leishmaniosen übertragen, eine Gruppe von Infektionskrankheiten, die durch verschiedene Arten von einzelligen Parasiten hervorgerufen werden. Sandmücken sind Süd-Deutschland verbreitet (nachgewiesen entlang des Rheingrabens in Baden-Württemberg und in Oberbayern), sowie in allen Anrainerstaaten des Mittelmeeres, in Portugal, in der Schweiz und in Belgien. Die theoretische Verbreitungsgrenze stellt die 10 °C-Jahresisotherme dar. Die tatsächliche nördliche Verbreitungsgrenze ist derzeit in Europa unklar. In Deutschland sind Sandmücken ab 14,5 °C flugaktiv. Der Leishmaniose-Parasit ist an Wintertemperaturen von 5 bis 10 °C und an Sommertemperaturen von 20 bis 30°C gebunden. Generell kann eine Leishmaniose überall dort erworben werden, wo mit Leishmanien infizierte Sandmücken vorkommen. Die Aktivität von Sandmücken ist im Allgemeinen auf die Dämmerungs- und Nachtstunden beschränkt. Ein Risiko der Infizie-

rung besteht daher für alle Personen, die sich zu dieser Zeit im Freien aufhalten. Besondere Risikogruppen für eine Erkrankung sind Kinder und immunsupprimierte Erwachsene (z. B. auf Grund einer HIV-Infektion).

Eine Temperaturerhöhung in Europa wird das Ausbreitungsgebiet der Sandmücken weiter nach Norden ausdehnen. Eine Verlängerung der sommerlichen Aktivitätsperiode kann weiter dazu führen, dass zwei anstatt einer Generation pro Jahr gezeugt werden und damit zu einer erhöhten Vektorenhäufigkeit führen (DANIEL et al. 2002). Es muss mit einer Zunahme des potentiellen Risikos für die Übertragung von Leishmaniosen infolge des Klimawandels gerechnet werden.

6 Risiken durch Pollen

Pollen gelten als entscheidende Auslöser von allergischen Erkrankungen wie einige Arten von Asthma und Heuschnupfen. Details dazu sind in diesem Heft dem Beitrag über „Allergene Pollen" (Kapitel 4) zu entnehmen. Klimatische Veränderungen können das Milieu allergener Pollen beeinflussen. Retrospektive Untersuchungen zeigen folgende Auswirkungen der komplexen klimatischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte:

- früherer Pollenflugbeginn,
- längere Pollenflugsaison,
- Zunahme der Pollenmenge,
- Veränderung der Verteilung und des Auftretens von Pollen.

Belegen lassen sich die genannten Auswirkungen sowohl durch Einzeluntersuchungen an allergenen Pollen (z. B. Vorverschiebung und Verlängerung der Saison von Hasel-, Birken- und Graspollen bei Zunahme der Pollenkonzentration zwischen 1969 und 1996 in der Schweiz) als auch durch eine grundsätzliche Änderung der Phänologie (z. B. Vorverschiebung der phänologischen Frühlingsphase; Vorverschiebung und Verlängerung der Wachstumsphase). Die phänologischen Veränderungen sind dabei als Indikator für das Verhalten allergener Pollen zu verstehen. Zusätzlich ist eine Zunahme des Potentials allergener Pollen durch Neophyten zu beobachten. Insbesondere die Ambrosia zeigt in den letzten Jahren eine starke Ausbreitung in Europa, die u. a. auch einen klimatologischen Trend widerspiegelt. Große Populationen existieren in Ungarn, Slowakei, Rumänien, Serbien, Bosnien-Herzegowina und Kroatien, während die Kenntnisse über die Verbreitung in Deutschland noch sehr lückenhaft sind.

Die bisher ermittelten Trends des Pollenmilieus zusammen mit experimentellen Untersuchungen bei doppelter CO_2-Konzentration (z. B. Zunahme der Gräser- und Ambrosiapollen) stützen die Vermutung, dass sich die Veränderung des Pollenmilieus auch zukünftig in der genannten Weise fortsetzen könnte. Auf Grund der Komplexität der Zusammenhänge hat eine solch einfache Extrapolation jedoch nur begrenzte Aussagekraft. So werden die Produktion und Freisetzung der Pollen ganz entscheidend vom Wetter während der Pollensaison beeinflusst (z. B. Abnahme der Pollenkonzentration bei Niederschlägen). Bei häufigerem Regen im Frühjahr kann die Pollenkonzentration in der Atmosphäre geringer sein, auch wenn die Pollenproduktion der Pflanzen steigt. Daraus resultieren beträchtliche Unsicherheiten, da die gegenwärtigen Projektionen über das künftige Klima solchen Anforderungen an die Detailgenauigkeit noch nicht genügen. Zudem ist die Änderung des Pollenmilieus wesentlich stärker mit der Änderung der Landnutzung und landwirtschaftlichen Aktivitäten assoziiert als mit dem Wetter.

Auch auf der Seite der Wirkungszusammenhänge bleiben noch Unklarheiten. Es ist nicht gesichert, ob eine Zunahme der Pollenkonzentration auch eine stärkere allergene Wirkung zur Folge hat. Die Pollenkonzentration ist nur eine Teilkomponente im Komplex der potentiell Asthma auslösenden Luftbeimengungen und Asthma-Epidemien lassen sich nur in etwa jedem siebenten Fall mittels Pollenkonzentration vorhersagen. Andererseits gibt es Hinweise, dass die klinische Relevanz von akuten Asthmaanfällen bei erhöhten Pollenkonzentrationen zunimmt.

7 Anpassungsstrategien

Die Exposition gegenüber den Klimarisiken sowie die Fähigkeit, sich klimabedingten Veränderungen anzupassen, bestimmen die Anfälligkeit gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels. Die rechtzeitige Umsetzung von geeigneten Anpassungsstrategien kann eine Minimierung der negativen Gesundheitsfolgen des Klimawandels ermöglichen. Grundsätzlich ist Anpassung dabei als langfristiger Prozess zu verstehen, da die Strategien wegen der Unsicherheiten der konkreten zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels und des voranschreitenden wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns wiederholter Nachbesserungen bedürfen können.

Anpassungsstrategien sind besonders bedeutsam für die von den negativen Auswirkungen des Klimawandels vornehmlich betroffenen Personen. Dazu gehören alle mit gesundheitlicher Vorbelastung wie alte und geschwächte Menschen, aber auch Kinder mit ihrem sich noch entwickelnden Immunsystem. Auch soziale Faktoren wie ein mangelnder Zugang zu Informationen und materiellen Gütern oder eine fehlende soziale Eingebundenheit kennzeichnen besondere Risikogruppen.

In Deutschland und Mitteleuropa ist die wahrscheinlich wichtigste negative Gesundheitsfolge des Klimawandels die Belastung des menschlichen Organismus durch Hitze. Ohne Anpassungsmaßnahmen ist die deutsche Bevölkerung mäßig bis stark anfällig gegenüber negativen Hitzewirkungen. Ein regional erhöhtes

Risiko besteht für den Oberrheingraben sowie für Ballungszentren, besonders in klimatisch ungünstigen Kessellagen. Nach bisherigen Erfahrungen bestehen wirksame Vorsorgemaßnahmen vor allem in Form von Aufklärung und Warnung. In einer Reihe von europäischen Ländern gibt es Hitzewarnsysteme, die überwiegend aus einer Warn- und einer Interventionskomponente bestehen. In Deutschland haben alle Bundesländer in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst entsprechende Systeme eingeführt, die mit lokal angepassten Interventionsmaßnahmen verbunden sind und zeitlich und räumlich konkretisierte Warnungen und Verhaltensempfehlungen ausgeben.

Im Gegensatz zu den Hitzewarnsystemen werden mögliche Maßnahmen zur klimaorientierten Stadtplanung und angepassten Gebäudearchitektur überwiegend nur diskutiert und sind weit von einer Umsetzung entfernt. Gerade in Ballungszentren sollte für eine ausreichende Durchlüftung zur Reduktion des Wärmeinseleffekts gesorgt werden. In Gebäuden können ausreichende Isolation und für besondere Risikogruppen (z. B. in Alten- und Pflegeheimen) auch Kühlmöglichkeiten zur Verminderung der Wärmebelastung in den Innenräumen beitragen.

Im Bereich des Wasserhaushalts erfordern vor allem die erhöhte Hochwassergefahr und die Verringerung des Wasserdargebots im Sommer die Weiterentwicklung von Anpassungsstrategien, um Beeinträchtigungen der Gesundheit zu vermeiden. Bisherige Hochwasserschutzmaßnahmen müssen an die wahrscheinlich ansteigende Wiederkehrfrequenz und die mögliche Erhöhung des Abflusses angepasst werden. Das Auftreten von möglichen Zeitspannen mit Trockenheit erfordert eine nachhaltige Landnutzung, die das Verweilen des Wassers in der Landschaft sichert. Außerdem müssen infrastrukturelle Anpassungen erfolgen, wie ausreichende Bevorratung von Wasser in Talsperren oder die Möglichkeit, Trinkwasser über Fernwasserleitungen bereitzustellen (UBA 2005, AK KLIWA 2006).

Die negativen Gesundheitsfolgen der Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht und der damit potentiell stärkeren UV-Strahlung werden in starkem Maße vom menschlichen Verhalten beeinflusst. Daher kommt vor allem der Aufklärung über die Risiken übermäßiger Sonnenexposition und die Möglichkeiten für persönliche Schutzmaßnahmen große Bedeutung zu. Die grundsätzlichen Verfahren dazu existieren bereits: Zur Information der Bevölkerung dient der UV-Index, ein weltweit einheitliches Maß für die sonnenbrandwirksame UV-Strahlung. Vorhersagen des UV-Index werden täglich vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt, sowohl für die Bevölkerung in Deutschland als auch im Rahmen der Zusammenarbeit in der WMO für alle europäischen Wetterdienste. Die Vorhersagen werden für Deutschland durch UV-Warnungen ergänzt, sofern absolut oder saisonal besonders hohe Werte des UV-Index auftreten (siehe auch Kapitel 6 in diesem Heft).
Im Bereich vektorübertragener Krankheiten herrscht noch große Unsicherheit über die genauen Zusammenhänge der Klimawirkung. Dennoch wird mit einer steigenden Gefahr gerechnet, da sich für eine Reihe von Krankheiten die Ausbreitungs- und Übertragungsbedingungen verbessern. Insbesondere die durch Zecken übertragene Borreliose stellt in Deutschland ein deutliches und steigendes Gesundheitsrisiko dar. Auf Grund des potentiell hohen Risikos und des aktuellen Anpassungsdefizits ist von einer hohen Anfälligkeit der Bevölkerung auszugehen. Die Anpassungsmöglichkeiten sind relativ beschränkt, da teilweise keine Impfungen existieren und Therapien oft langwierig und nicht immer Erfolg versprechend sind. Aufklärung und Warnung sind fast die einzigen wirksamen Maßnahmen.

Grundsätzlich sollten die durch den Klimawandel hervorgerufenen Gesundheitsprobleme in den Programmen für die öffentliche Gesundheitspflege berücksichtigt werden, um die Eindämmung der Krankheitserreger und ggf. Impfungen zu ermöglichen. Auch ein Ausbau der medizinischen Forschung und intensives Monitoring der entsprechenden Infektionskrankheiten sind erforderlich.

Obwohl Pollenallergien bereits gegenwärtig eine große gesundheitliche Herausforderung der westlichen Industriegesellschaften sind, bedarf das Wissen über den Einfluss der Klimaänderung auf den Pollenflug noch der Erweiterung. Dies gilt sowohl für die zukünftig zu erwartenden regionalen Verteilungen der Konzentration bekannter allergener Pollenarten als auch für die Verbreitung von neuen Arten mit allergenen Eigenschaften. Es ist sinnvoll die Pollenfluginformationssysteme qualitativ zu verbessern, die in Deutschland und einigen anderen Ländern Europas bereits den Status von operationellen Vorhersagesystemen haben.

Im Gesundheitswesen erscheint es notwendig, die proaktiven Anteile der Maßnahmenplanung weiter zu vergrößern, die auch Szenarien über künftige Klimaentwicklung und nicht nur Wetterereignisse und Klimatrends der Vergangenheit berücksichtigen. Werden die Anpassungsmaßnahmen realisiert, kann die Anfälligkeit der Bevölkerung auf ein geringes Maß reduziert werden (UBA 2005). Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung ist zudem eine Kopplung der Anpassungsmaßnahmen mit verstärkten Anstrengungen zur Minderung des Ausstoßes von Treibhausgasen zu fordern, um den Klimawandel und seine gravierenden Folgen zu bremsen.

Literatur

AK KLIWA, 2006: Unser Klima verändert sich. Folgen – Ausmaß – Strategien, 18 S.

DANIEL, M., KRIZ, B., EDWARDS, S., HAJAT, S., KOVATS, S., KOPPE, C., MENNE, B., EBI, K.L., 2002: Climate change impacts on health in Europe. *European Bulletin of Environmental Health* **9** (2), 8-10.

FAULDE, M., HOFFMANN, G., 2001: Vorkommen und Verhütung vektorassoziierter Erkrankungen des Menschen in Deutschland unter Berücksichtigung zoonotischer Aspekte. *Bundesgesundheitsblatt* **44**, 116-136.

IPCC, 2007: Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of the Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

KOPPE, C., 2005: Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **226**, Offenbach am Main.

MAIER, W.A., 2003: Mögliche Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Ausbreitung von primär humanmedizinisch relevanten Krankheitserregern über tierische Vektoren sowie auf die wichtigen Humanparasiten in Deutschland. *Umweltbundesamt*, Berlin 05/2003, 389 S.

MÜNCHNER RÜCKVERSICHERUNG, 2006: Topics Geo - Naturkatastrophen 2006. Analysen, Bewertungen, Positionen. *Münchner Rückversicherung*, 54 S.

PARSONS, K.C., 2003: Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance. 2. Ausgabe. *London, Taylor & Francis*.

UBA, 2005: Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. *Umweltbundesamt* – Forschungsbericht 00844. 205 S.

WHO, 1996: Climate Change and Human Health. McMichael, A.J., A. Haines, R. Sloof, S. Kovats (eds.). *WHO*, Geneva, 299 S.

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 157-160 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

Blick nach draußen

Das Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft -Der polnische Wetterdienst-

(**I**nstytut **M**eteorologii i **G**ospodarki **W**odnej, IMGW)

Das Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft (IMGW, Abb. 1) ist seit 88 Jahren verantwortlich für die Vorhersage gefährlicher Naturereignissen, die in der Atmosphäre und Hydrosphäre auftreten können, einschließlich der Warnungen vor diesen. Basis hierfür ist das dichte Mess- und Beobachtungsnetz, in dem meteorologische und hydrologische Daten gesammelt werden. Sie sind Ausgangspunkt für die Bearbeitung von Analysen, Wettervorhersagen, Warnungen und Gutachten sowie generell für die wissenschaftliche Forschungstätigkeit in der Meteorologie, Klimatologie, Hydrologie, Ozeanographie, im Umweltschutz und in anderen Forschungsgebieten, die mit der Atmosphäre und Hydrosphäre interdisziplinär verbunden sind.



Abb. 1: Das Gebäude der Hauptzentrale in Warszawa.

Das IMGW ist weiterhin verantwortlich für den meteorologischen und hydrologischen Allgemeinschutz, die Beratung der Luftfahrt, der Meereswirtschaft, der Fischerei und anderer Bereiche der Volkswirtschaft. Es stellt für die Medien und ausgewählte Kunden Wettervorhersagen und Warnungen bereit. Das Institut verfügt über rund 1300 Bedienstete, davon 800 hochqualifizierte Angestellte des Meteorologie- und Hydrologiedienstes (Beobachter, Synoptiker, technisches Personal) und 300 Wissenschaftler. Darüber hinaus sind 1000 freiwillige Beobachter für das IMGW tätig. Das Institut wird zu rund 80 % aus dem Staatshaushalt finanziert; rund 20 % seiner Einnahmen resultieren aus der kommerziellen Tätigkeit einschließlich der Luftfahrt. Das IMGW gehört zum Geschäftsbereich des polnischen Umweltministeriums.

Geschichtlicher Hintergrund

Die Geschichte des IMGW reicht zurück bis in das Jahr 1919, als zunächst zwei Einrichtungen entstanden: Das Institut für Hydrologie, zugeordnet dem Ministerium für Inneres sowie das Staatliche Institut für Meteorologie, zugeordnet dem Landwirtschafts- und Staatsgüterministerium. Am 8. Juni 1921 wurden durch eine Verordnung des Ministers für Gemeinarbeiten, Prof. Gabriel Narutowicz, die Ziele und Aufgaben des Instituts für Hydrologie präzisiert. Am 23. Mai 1922 verabschiedete der Legislativ-Sejm ein Gesetz, wodurch das Staatliche Institut für Meteorologie den Rang einer Forschungs- und Wissenschaftsanstalt erlangte, das mit dem staatlichen Meteorologischen Dienst für das Territorium der Republik Polen vereinigt wurde. Auch für militärische Aufgaben sollte es zuständig sein. Im Jahre 1932 entstand ein Entwurf zum Zusammenschluss des Instituts für Hydrologie mit dem Staatlichen Institut für Meteorologie zum Hydrologischen und Meteorologischen Dienst Polens. Das dazu beschlossene Gesetz, das in dem zuständigen polnischen Amtsblatt schon bekannt gegeben war, konnte aber vor dem Zweiten Weltkrieg nicht mehr realisiert werden.

Im Jahre 1945 fasste die Regierung den Beschluss, ein staatliches Institut für Hydrologie und Meteorologie (PIHM) ins Leben zurufen. Im Jahre 1972 wurde aus dem Zusammenschluss des PIHM mit dem Institut für Wasserwirtschaft das Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft gebildet. Das IMGW ist seither eine Einrichtung, in der geforscht und neue Methoden entwickelt werden. Es unterstützt die Aktivitäten des öffentlichen sowie privaten Sektors und bietet diesen verschiedene Serviceleistungen und Fachkenntnisse im Bereich der Meteorologie und Hydrologie an.

Erste Wetter- und Klimabeobachtungen gibt es in Polen seit Mitte des 17. Jahrhunderts. Instrumentelle Wetterbeobachtung begann im Jahre 1647. Im Rahmen des ersten meteorologischen Messnetzes, das Herzog Ferdinand II. in Florenz angeregt hatte, beteiligte sich ab 1655 auch ein Kloster in Warszawa (Warschau).

Die ersten Zeitreihen hydrologischer Beobachtungen stammen ebenfalls aus dem 17. Jahrhundert. Die ältesten erhalten gebliebenen systematischen Messungen datieren aus dem Jahr 1717 für Wrocław (Breslau), aus dem Jahr 1739 für Gdansk (Danzig), sowie aus den Jahren 1760 bis 1772 aus Torún

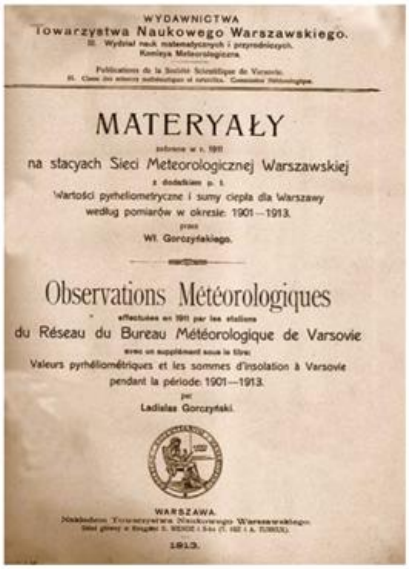

WYDAWNICTWA
Towarzystwa Naukowego Warszawskiego.
MATERYAŁY
na stacyach Sieci Meteorologicznej Warszawskiej
Wartości pyrheliometryczne i sumy ciepła dla Warszawy
według pomiarów w okresie: 1901—1913.
Wł. Gorczyńskiego.
Observations Météorologiques
du Réseau du Bureau Météorologique de Varsovie
Valeurs pyrhéliométriques et les sommes d'insolation à Varsovie
pendant la période 1901—1913.
Ladislas Gorczyński.
WARSZAWA.
1913.

Abb. 2: Meteorologisches Jahrbuch mit den Daten des Jahres 1911, veröffentlicht vom Staatlichen Institut für Meteorologie.

(Thorn). Kontinuierliche und flächendeckende meteorologische und hydrologische Beobachtungen und Messungen worden seit dem Anfang des 19. Jahrhunderts durchgeführt (vgl. Abb. 2).

Das aktuelle Mess- und Beobachtungssystem

Das derzeitige Mess- und Beobachtungsnetz besteht aus 61 Bodenstationen (Hauptstationen der Meteorologie und Hydrologie), drei aerologischen Stationen (ausgerüstet mit automatischem Sondensystem), acht Flugwetterstationen, vier meteorologischen Radarstationen, einen Satellitendatenempfänger sowie einem Netz von neun Sturmbeobachtungs- und -ortungssensoren. Außer den synoptischen Standardbeobachtungen existiert ein Messnetz für Luftbeimengungen und Radioaktivität, für die direkte Solarstrahlung, für die Strahlungsbilanz, für die Sonnenscheindauer, für den Wasserdampf und für katathermometrische Messungen zur Bestimmung der Abkühlungsgröße. Eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Atmosphärenzustände spielt zudem das Wetter-, Niederschlags-, Heliographen- und Totalisatorstationsnetz. Messwerte von fast 800 Pegeln von Flüssen und Seen ermöglichen eine hydrologische Überwachung einschließlich Wasserstands-Prognosen.

Niederschlagsummen und Schneehöhen werden an über 970 Niederschlagsstellen gemessen. Die Daten von 150 daraus ausgewählten Stationen werden täglich in die Zentrale geliefert.

Aus dem automatisierten meteorologischen und hydrologischen Stationsnetz wiederum laufen die Daten von 1000 Stationen automatisch in der Zentrale ein, so dass diese sofort steuernd in der Vorhersage berücksichtigt werden können.

Das meteorologische Radarssystem POLRAD

Das meteorologische Radarssystem POLRAD besteht aus acht modernen meteorologischen Dopplerradargeräten, die das Territorium von Polen abdecken (Abb. 3). Die Radaranlagen werden zentral vom Radaroperationszentrum gesteuert, das sowohl für die Fernsteuerung und Überwachung der Anlagen, als auch für die Datenaufnahme, deren Verarbeitung und Weitergabe an die Nutzer verantwortlich sind. Die Radardaten werden gemeinsam mit den Ergebnissen des mesoskaligen Wettervorhersagemodells durch das Nimrodverfahren für die kurzfristige Vorhersage des Wetters und hydrologischer Größen verarbeitet.



Abb. 3: Meteorologische Radaranlage in Rzeszów.

Das Blitzlokalisierungs- und Blitzaktivitätssystem PERUN

Das Blitzlokalisierungssystem PERUN (Abb. 4) ermöglicht eine auf 1 km genaue Lokalisierung der Blitzaktivität und ihrer Intensität. Die zeitliche und räumliche Identifizierung der Einzelentladungen in der Atmosphäre wird gemeinsam mit anderen synoptischen Erscheinungen flächenhaft dargestellt, so dass eine Vorhersage der Verlagerung und Intensivierung der Gewitterzonen möglich ist.



Abb. 4: Der Sensor zur Lokalisierung von Blitzentladungen in Toruń.

Das Wettervorhersagesystem

Wettervorhersagen, wie auch meteorologische und hydrologische Warnungen, werden in der zentralen



Abb. 5: Das Büro für Flugwettervorhersagen in Warszawa.

und in den regionalen Vorhersagezentralen erarbeitet (Abb. 5). Die Prognosen und Warnungen stützen sich dabei – dank der guten internationalen Zusammenarbeit auf die Ergebnisse der meteorologischen mesoskaligen Modelle COSMO und ALADIN. Diese werden auf dem Großrechner SGI Origin 3800 gerechnet. Die Einführung moderner Messsysteme und Prognosemethoden ermöglichte zuletzt eine bedeutende Verbesserung der Güte der Prognosen und der darauf beruhenden Warnungen.

Das in Krakau installierte Empfangsanlage für Satellitendaten ermöglicht die Verarbeitung der Daten der neuen Satelliten-Generation (MSG). Ihre hohe Aufnahmefrequenz (alle 15 Minuten), ihre hohe räumliche Auflösung sowie die 12 zur Verfügung stehenden Spektralkanäle ermöglichen es, die Satellitendaten effektiv zu nutzen, zum Beispiel für die synoptische Analyse und die daran sich anschließenden meteorologischen und hydrologischen Prognosen, für die Überwachung der Umwelt, für die Klimaforschung oder zur Überwachung und Warnung vor Wasserverschmutzungen, Waldbränden und ähnlichem.

Das moderne Vorhersagesystem in der Hydrologie wird durch die Vorhersage der Wasserstände für die Pegelprofile, sowie für die Orte, an denen vermessene Geologieschnitte vorliegen, ermöglicht. Die hydrologischen Prognosen liefern den Termin und die Höhe der Flutwelle und liefern den Wasserstandsverlauf für das bekannte Geländeprofil.

Der technische Überwachungsdienst für Staudämme

Seit dem Jahr 1986 arbeitet im IMGW auch der technische Überwachungsdienst für die Staudämme (TKZ, Abb. 6). Sein Aufgabengebiet umfasst umfangreiche Messungen zur Verlagerung und Verformung der Staudämme, Berechnungen der inneren Spannungen innerhalb der Bauwerke, die Bewertung sich ändernden Untergrunds, die Überwachung des Flussbetts und des Staubeckenfundaments, sowie weitere Komponenten, die für die Sicherheit dieser Objekte maßgeblich sind. Jedes Jahr wird ein Bericht über den technischen Stand und die Sicherheit der mehr als 100 Wasserbauwerke sowie ein Gesamtbericht über den Stand der Hauptstaubau-



Abb. 6: Der Staudamm Mylof.

werke in Polen erstellt.

Die Umweltüberwachung

Seit dem Jahr 1988 wird durch das IMGW in Zusammenarbeit mit dem Woiwodschaftsaufsichtsamt für Umweltschutz die Wasserqualität überwacht. An dieser Aufgabe nehmen 363 Kontroll- und Messstationen teil, die wiederum eingebunden sind in die laufenden internationalen, Landes- und Regionalmessprogramme.

Die Überwachung der Ostsee erfolgt durch das eigene Forschungsschiff „FS Baltica" (Abb. 7). Im Frühwarnsystem vor radioaktiver Belastung der Luft arbeiten neun automatische Messstationen. Auch die Überwachung des atmosphärischen Ozons, der Ultraviolettstrahlung und der Hintergrundbelastung der Luft wird regelmäßig durchgeführt. Diese Daten fließen in das staatliche Umweltüberwachungssystem und stehen dort für weitergehende Untersuchungen zur Verfügung.



Abb. 7: Das Forschungsschiff „Baltica".

Die wissenschaftlichen Forschungstätigkeiten

Zu den gesetzlichen Aufgaben des IMGW gehört die Steuerung der Forschung in den Ressorts, für die es verantwortlich ist. Die Forschung ist vor allem ausgerichtet auf den Erwerb und die Vertiefung von Grundlagenwissen über die Beobachtungssysteme meteorologischer (Abb. 8) und hydrologischer Parameter, das Sammeln von Daten und deren Analyse (Abb. 9a, b), der numerischen Modellierung in der Meteorologie und der Hydrologie sowie die Verwendung der Radar- und Satellitendaten innerhalb des IMGW.



Abb. 8: Datenüberwachung in der zentralen Klimatologieabteilung des Staatlichen Meteorologischen Institutes in Warszawa.



Abb. 9: Das meteorologische Hochgebirgsobservatorium auf dem Kasprowy Wierch (oben und unten).

Die Organisationseinheiten des IMGW führen Forschungsarbeiten durch in den Bereichen Klimatologie, Atmosphärenphysik, Aktinometrie, Aerologie, Agrarmeteorologie, Luftbeimengungen, Messgeräte, Wetter- und Hydrologievorhersage sowie Ozeanographie. Darüber hinaus erstellen die Mitarbeiter des IMGW wissenschaftliche Gutachten für die Wirtschaft.

Internationale Zusammenarbeit

Die Internationale Zusammenarbeit hat für den polnischen Wetterdienst einen hohen Stellenwert. Dabei soll hervorgehoben werden, dass der ehemalige Vertreter des – damals noch privaten polnischen Wetterdienstes, Prof. Władysław Kwietniewski, im Jahre 1873 einer der 32 offiziellen Delegierten war, die auf dem ersten internationalen Meteorologenkongress in Wien die Internationale Organisation für Meteorologie IMO ins Leben riefen. Nach dem Zweiten Weltkrieg war Polen einer der 40 Gründerstaaten der Weltorganisation für Meteorologie WMO.

Das IMGW ist verantwortlich für die nationale Umsetzung der durch Polen ratifizierten Verträge, so der Konvention der Weltorganisation für Meteorologie WMO, der Konvention der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO, sowie die Konvention über die Sicherheit des Lebens im Meer SOLAS. Das IMGW arbeitet selbstverständlich mit den europäischen und außereuropäischen meteorologischen und hydrologischen Diensten zusammen. Diese Kooperation äußert sich zum einen in einem permanenten Datenaustausch, zum anderen in der Koordination der einzelnen nationalen Aktivitäten, um die Arbeitsergebnisse international vergleichbar zu machen und somit die gemeinsame Umsetzung der großen internationalen Forschungsprojekte zu ermöglichen.

Der Eintritt Polens in die Europäische Union, die Mitgliedschaft in der Europäischen Organisation zur Nutzung von meteorologischen Satelliten EUMETSAT und die Teilnahme an den Arbeiten des Konsortiums für die numerische Modellierung ALADIN und COSMO bieten neue Entwicklungsmöglichkeiten.

Das IMGW nimmt an der Umsetzung der vielen nationalen und internationalen Programmen und Forschungsprojekten teil, die ihren Niederschlag finden in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen, für die IMGW gleichzeitig der Herausgeber darstellt.

Die Ergebnisse der Arbeiten des meteorologischen und hydrologischen Dienstes sind über die Webseite www.imgw.pl (die deutschsprachigen Seiten sind im Aufbau) sowie in den einschlägigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Forschungs- und Entwicklungsabteilung zugänglich.

Anschrift des Autors:

Dr. Ryszard Klejnowski
Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft (IMGW)
Instytut **M**eteorologii i **G**ospodarki **W**odnej
Ul. Podlesna 61
PL - 01-673 Warszawa
E-Mail:
Ryszard.Klejnowski@imgw.pl
http://www.imgw.pl

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 161-166 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

Institute stellen sich vor

Das Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln

The Institute for Geophysics and Meteorology at the University of Cologne

Zusammenfassung
Seit 1938 ist die Meteorologie an der Universität zu Köln repräsentiert. Einzig in Deutschland bildet sie zusammen mit der Geophysik ein gemeinsames Institut mit drei Professuren in der Meteorologie und zwei in der Geophysik. Neben dem im Wintersemester 2006/2007 gestarteten Bachelor-Programm „Geophysik und Meteorologie" wird derzeit ein Masterstudiengang „Geophysik und Meteorologie" konzipiert, in den auch das Studienangebot der Universität Bonn integriert wird.

Abstract
Meteorological research and teaching have been active in the University of Cologne ever since 1938. Today, the Institute for Geophysics and Meteorology has three professors for meteorology and two professors for geophysics, a combination unique in Germany. Since the 2006/2007 winter semester, a new teaching program for "Bachelor of Geophysics and Meteorology" has been established. The subsequent Masters program is currently under development; it integrates the teaching program of the University of Bonn.

1 Historie und Menschen

Die Geschichte der Meteorologie an der Universität zu Köln beginnt im Jahr 1938 weit vor der Gründung eines eigenständigen Instituts. Damals erhielt Helmut Berg, Leiter der Wetterflugstelle Köln des Reichswetterdienstes, eine Dozentur für Meteorologie. Er hatte in Heidelberg Meteorologie, Astronomie, Geophysik und Physik studiert und sich dort 1937 habilitiert. Anfang 1945 wurde er zum außerplanmäßigen Professor für Meteorologie ernannt.

Auf Antrag der Bürger der Stadt Köln wurde 1946 die Gründung des Meteorologischen Instituts betrieben, dessen Leitung 1947 Helmut Berg übernahm, nachdem er aus dem Wetterdienst ausgeschieden war. Im Jahr 1951 erhielt er auch die Lehrbefugnis für Geophysik. Nach dem plötzlichen Tod von Helmut Berg am 2. März 1960 wurde zum 1. Oktober 1961 Hans Karl Paetzold als Ordentlicher Professor nach Köln berufen. Mit seiner Berufung wurde das Institut in „**I**nstitut für **G**eophysik und **M**eteorologie" (IGMK) umbenannt. Der personelle Ausbau des Instituts erfolgte durch eine zusätzliche Professur für Meteorologie, die am 1. August 1965 mit Gustav Hofmann besetzt wurde. Die Zahl der Mitarbeiter nahm ständig zu, so dass – wenige Jahre nach dem Bezug des Institutsgebäudes in der Zülpicher Straße 49a (Abb. 1 (a)) im Sommer 1963 – die Meteorologie im Frühjahr 1969 in ein separates Gebäude in der Kerpener Straße 13 (Abb. 1 (b)) verlegt wurde. Am 1. November 1973 folgte Erhard Raschke Gustav Hofmann nach, der einem Ruf nach München gefolgt war. Das Lehrpersonal sowohl im Bereich Geophysik als auch in der Meteorologie wurde in den folgen-

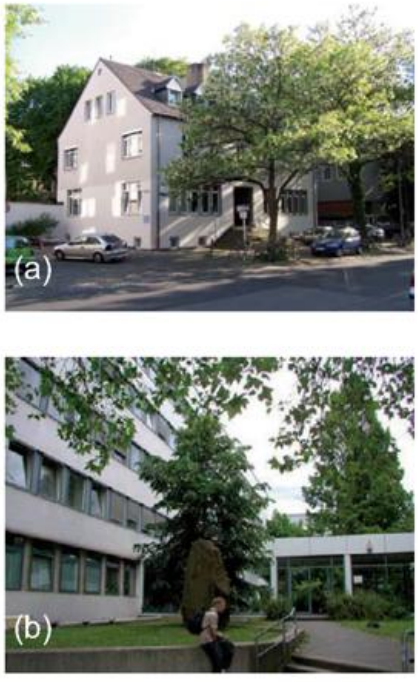


Abb. 1: Gebäude des Instituts für Geophysik und Meteorologie in der Kerpener Straße 13 (a) und in der Zülpicher Straße 49a (b).

den Jahren kontinuierlich aufgestockt. Im Januar 1978 verstärkte Peter Speth als Professor für Meteorologie die meteorologische Abteilung. Im Januar 1980 wurde Adolf Ebel zum Professor für Geophysik ernannt, nachdem er bereits seit 1975 als apl. Professor in Köln tätig war. Im April 1982 wurde Fritz Neubauer als Nachfolger von Hans Karl Paetzold berufen.

Erhard Raschke verließ das Institut im Oktober 1989 und folgte einem Ruf zum Direktor des Instituts für Physik der Atmosphäre bei der GKSS. Michael Kerschgens wurde im August 1992 als sein Nachfolger zum Professor für Meteorologie ernannt. Nach der Pensionierung von Adolf Ebel im Oktober 1998 folgte Bülent Tezkan 1999 einem Ruf als Professor für Geophysik an das Institut. Fritz Neubauer wurde aus gesundheitlichen Gründen im Juli 2005 vorzeitig emeritiert. Seine Nachfolge trat im Januar 2006 Joachim Saur an. Peter Speth wurde 2005 in den Ruhestand versetzt. Neben seiner Nachfolge, die im Januar 2007 von Yaping Shao angetreten wurde, konnte noch eine weitere Professur geschaffen werden, so dass das IGMK in der Meteorologie jetzt durch drei Professoren repräsentiert wird. Im Mai 2006 wurde Susanne Crewell auf die neu geschaffene Stelle berufen.

Die Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich wurde bereits am 1. November 1974 durch eine gemeinsame Berufung von Dieter Ehhalt zum Direktor des Instituts für Chemie des Forschungszentrums Jülich und gleichzeitig zum Professor für Geophysik an der Universität zu Köln manifestiert. Sein Nachfolger, Andreas Wahner, wurde 2001 zum Direktor am Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre am FZ Jülich und gleichzeitig als Professor für Meteorologie an der Universität zu Köln berufen.

Das wissenschaftliche Personal in der Meteorologie besteht aus dem Akademischen Rat Jürgen Wirth und den wissenschaftlichen Assistenten Frank Steffany (Umweltmeteorologie, Flugmeteorologie, Studienberatung), Ulrich Löhnert (Integrierte Fernerkundung) und Thomas Sperling (Energiemeteorologie). Des Weiteren werden aus verschiedenen Drittmitteln etwa zehn Postdoktoranden und etwa 12 Doktoranden finanziert. Wie an den meisten meteorologischen Instituten üblich sind die Studenten nach dem Vordiplom in der Regel als studentische Hilfskräfte in verschiedenen Projekten tätig. Systemadministration und Sekretariat, ohne deren Kompetenz das Institut nicht lebensfähig wäre, komplettieren das Personal.

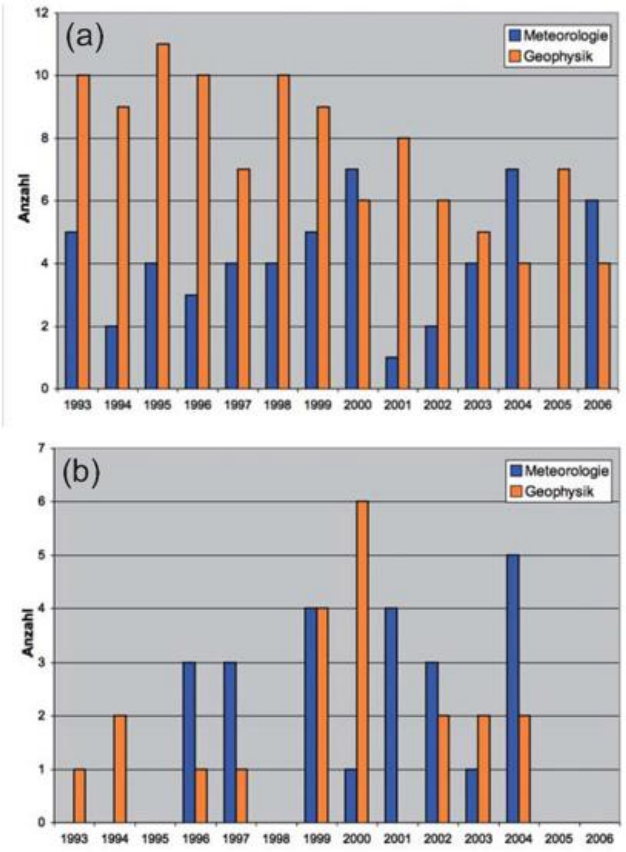


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung der Diplome (a) und Promotionen (b) in Geophysik und Meteorologie an der Universität zu Köln.

Die Geophysik hat zwei fest angestellte wissenschaftliche Mitarbeiter. Herr Alexandre Wennmacher und Herr Rainer Bergers übernehmen neben ihren wissenschaftlichen Tätigkeiten allgemeine und spezielle Institutsaufgaben (Systemadministration, Wartung und Reparatur wissenschaftlicher Geräte usw.). Hinzu kommen eine C1-Stelle und 1,5 wissenschaftliche Mitarbeiterstellen (Zeitverträge). Des Weiteren werden aus verschiedenen Drittmitteln Postdoc- und Doktorandenstellen finanziert.

Die mit den neuen Arbeitsgruppen in der Meteorologie verbundene Vergrößerung des Mitarbeiterstabes führte dazu, dass die Räumlichkeiten in der Kerpener Str. 13 nicht mehr ausreichten. Daher wurden fünf Räume in der Zülpicher Str. 49a direkt neben denen der Geophysik für die Meteorologie eingerichtet. Mittelfristig ist geplant, dass die gesamte Meteorologie in dieses Gebäude umzieht und so das Institut für Geophysik und Meteorologie auch räumlich wiedervereint wird.

2 Lehre

Der Großteil der Lehre findet derzeit noch in den Diplom-Studiengängen Geophysik und Meteorologie statt. Im Durchschnitt haben seit 1993 etwa 8/4 Diplomanden/innen ihr Studium in Geophysik/Meteorologie jährlich erfolgreich abgeschlossen (Abb. 2). In den letzten Jahren wurden mit Andreas Fink (2004), Hendrik Elbern (2001), Uwe Ulbrich (2000), Andreas Hördt (2000), Andreas Wahner (1999) und Martin Pätzold (1998) mehrere erfolgreiche Habilitationen durchgeführt. 2003 erfolgte zudem die Umhabilitation von Stefan Emeis nach Köln.

Im Wintersemester 2006/2007 haben erstmals 42 Studierende ihr Studium in dem neu akkreditierten Bachelor-Studiengang „Geophysik und Meteorologie" begonnen. Der Bachelor-Studiengang ist modular aufgebaut, so dass die Studierenden neben durchzuführenden Pflichtmodulen in Mathematik und Physik entscheiden können, ob der Studienschwerpunkt Geophysik oder Meteorologie sein soll. Das Modul „Studium Integrale" bietet den Studierenden die Möglichkeit, durch Einbindung von Angeboten anderer Fakultäten vor allem berufsbildende Kompetenzen z. B. in den Bereichen Wirtschaft, Soziologie, Jura, Sprachen oder Medizin zu erhalten. Derzeit entsteht ein Masterstudiengang „Geophysik und Meteorologie", der dann ab dem Wintersemester 2009/2010 ein weiterführendes Studium ermöglicht. Außerdem ist das Institut an dem interfakultativen Masterstudiengang IMES (**I**nternational **M**aster of **E**nvironmental **S**ciences) beteiligt, dessen Initiierung, Organisation und Einführung (Wintersemester 2002/2003) an der Universität zu Köln federführend übernommen wurde.

Seit 1965 erscheint die Schriftenreihe „Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie" (ISSN 0069-5882), in der die am Institut entstandenen Promotionen in deutscher oder englischer Sprache veröffentlicht werden. Im Laufe der Zeit sind in dieser Reihe jedoch auch interessante Forschungsberichte aus den unterschiedlichsten Arbeitsgruppen erschienen.

3 Forschung

Geophysik und Meteorologie gehören zu den in der Forschung erfolgreichsten Instituten der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Die Forschungsrichtungen am Institut entwickelten sich parallel zum Personalaufbau, wobei unter Helmut Berg erste Arbeiten zur Stadtmeteorologie durchgeführt wurden. Mit Hans Karl Paetzold verschob sich die wissenschaftliche Ausrichtung zur Geophysik mit einem Schwerpunkt in der Ozonsondierung. Mit Gustav Hofmann und Erhard Raschke erhielt die Meteorologie wieder das gleiche Gewicht wie die Geophysik. Gustav Hofmanns Forschungsinteresse lag auf dem Gebiet der Mikrometeorologie. Erhard Raschke forschte erfolgreich in den damals noch sehr neuen Bereichen des Strahlungstransports und der Satellitenmeteorologie. Peter Speth erweiterte das Spektrum der Meteorologie in Köln um die großskalige atmosphärische Diagnostik. Michael Kerschgens knüpfte mit einem seiner Arbeitsgebiete, der Umweltmeteorologie, wieder an erste Untersuchungen von Helmut Berg an. Zusätzlich wurde am Institut die Entwicklung mikro- und mesoskaliger Modelle vorangetrieben. Dies schuf Verbindungspunkte zum 1987 von Adolf Ebel mitbegründeten **R**heinischen **I**nstitut für **U**mweltforschung (RIU) an der Universität zu Köln und zum Projekt EURAD (www.eurad.uni-koeln.de). Susanne Crewell knüpft mit ihrer Arbeitsgruppe für „Integrierte Fernerkundung" an die Arbeitsrichtung von Erhard Raschke an und stärkt mit modernen Sondierungsmethoden die experimentelle Ausrichtung des Instituts. Yaping Shao verstärkt mit einer numerisch ausgerichteten Hydrodynamik die theoretischen Aspekte der meteorologischen Forschung am Institut. Die Arbeitsrichtung von Peter Speth wird von Andreas Fink, der nach seiner Habilitation 2004 als Hochschuldozent am Institut tätig ist, fortgeführt und durch Aspekte der tropischen und subtropischen Meteorologie ergänzt.

Fritz Neubauers Forschungsschwerpunkte lagen auf dem Gebiet der erdnahen Weltraumphysik. Diese auch international sehr erfolgreiche Arbeitsrichtung wird von Joachim Saur fortgeführt. Das Spektrum der Geophysik wird durch moderne Methoden der oberflächennahen Explorationsgeophysik von Bülent Tezkan komplettiert. Adolf Ebel war neben seinen Tätigkeiten im Rahmen von EURAD in der Erforschung der Zirkulation der oberen Atmosphäre aktiv. Dieter Ehhalt und später Andreas Wahner vertreten die luftchemischen Komponenten der Geophysik und Meteorologie in Forschung und Lehre.

Neben den für die einzelnen Arbeitsgruppen spezifischen Forschungsaktivitäten gibt es mehrere übergreifende Projekte, die auch in enger Kooperation mit dem Bonner Meteorologischen Institut durchgeführt werden. Dazu gehören zwei im Bereich der Afrikaforschung angesiedelte Projekte: das vom BMBF zur Untersuchung des **Glo**balen **Wa**ndels (GLOWA) geförderte Projekt IMPETUS (**I**ntegratives **M**anagement-**P**rojekt für einen **E**ffizienten und **T**ragfähigen **U**mgang mit **S**üßwasser in Westafrika), welches in Köln koordiniert wird, und das EU-FP6-Projekt AMMA (**A**frican **M**onsoon **M**ultidisciplinary **A**nalysis). Des Weiteren sind die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Projekte im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1167 zur „Quantitativen Niederschlagsvorhersage" und des Transregio 32 „Pattern in Soil-Vegetation-Atmosphere Systems: Monitoring, Modelling, and Data Assimilation" zu nennen.

3.1 Forschung in den Arbeitsgruppen

Die Arbeitsgruppe von Michael Kerschgens befasst sich mit aktuellen Fragen anthropogener Klimamodifikationen. Dieser Fragenkomplex wird mit Hilfe numerischer Simulationsmodelle bearbeitet, die in den letzten Jahren am Institut entwickelt wurden. Im Zentrum dieser Entwicklungen stehen die Modellsysteme WITRAK (**Wi**nd **Tra**nsport und **K**limatologie) und das mikro/ mesoskalige Modell FOOT3DK (**F**low **O**ver **O**rographically Structured **T**errain, **3**-**D**imensional, **K**ölner Version). Während das menügesteuerte Modellsystem WITRAK ingenieurtechnischen Anwendungen im Bereich der Luftreinhaltung und Windfeldstatistik dient, hat sich

FOOT3DK eher als Forschungsmodell etabliert.

Zudem wurde aufbauend auf WITRAK ein Modul zur Windenergieprognose entwickelt, das in einer von Mitarbeitern des Instituts gegründeten Beratungsfirma genutzt und weiterentwickelt wird. Beispiele für Forschungsprojekte sind, neben diversen Mustergutachten in Kooperation mit Behörden und Industrieunternehmen, anwendungsorientierte Forschungsvorhaben zur Prognose der Ozonproduktion aus Verkehrsänderungsszenarien, Untersuchungen zur Änderung des lokalen Klimas, stadtklimatische Untersuchungen sowie Grundlagenforschungen zur Wechselwirkung von Oberflächenheterogenitäten mit dem Strömungsverhalten der Atmosphäre. Auf dem Gebiet der Modellierung der Ausbreitung von Luftbeimengungen existieren Kooperationen mit Nachbaruniversitäten, der EURAD-Gruppe, dem ZAIK (**Z**entrum für **A**ngewandte **I**nformatik, **K**öln) und der GRS Köln (**G**esellschaft für Anlagenbau und **R**eaktor**s**icherheit). In den letzten Jahren dehnte sich der Skalenbereich der Forschungsinteressen der Arbeitsgruppe auf die Skalenwechselwirkung zwischen lokalen und regionalen atmosphärischen Phänomenen aus. So wird FOOT3DK im Rahmen des Projektes IMPETUS als dynamisches Werkzeug für die Prognose der Änderung des Niederschlags in Westafrika in einem zukünftigen Klima eingesetzt. Hierbei kommen statistisch dynamische Methoden zum Einsatz, die erst eine realitätsnahe Abschätzung regionaler Klimaänderungen auf Grund lokaler kleinräumiger modifizierter Oberflächeneigenschaften durch den Menschen ermöglichen. Der statistisch dynamische Antrieb von FOOT3DK mit Hilfe eines regionalskaligen Modells oder mit Hilfe von Analysedaten stellt auch die grundsätzliche Methode für ein Projekt mit der Versicherungswirtschaft dar. So wird es möglich, mit hoher räumlicher Auflösung zukünftige Gefährdungspotentiale durch Sturmschäden abzuschätzen. Im Bereich der mikro- und mesoskaligen Wechselwirkungen wird im Rahmen des DFG/Transregio32 untersucht, inwieweit sich die Muster von Oberflächenheterogenitäten in den turbulenten Strukturen der Wasserdampf- und Kohlendioxydkonzentration der Atmosphäre abbilden.

Der Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe „Integrierte Fernerkundung“ um Susanne Crewell liegt in der Kombination von modernsten Fernerkundungsmethoden und deren Nutzung zur Evaluierung/Verbesserung von atmosphärischen Modellen. Eine zentrale Komponente spielt dabei die Mikrowellenradiometrie. In diesem Bereich werden neuartige Geräte zur verbesserten Erfassung der bewölkten Atmosphäre konzipiert und erprobt sowie Studien zu zukünftigen Satelliteninstrumenten durchgeführt. Ein Beispiel dafür ist ein polarisiertes 90/150 GHz Radiometer (DPR), das auf der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (Abb. 3) betrieben wird. Damit soll sowohl eine genauere Bestimmung des Wolkenflüssigwassergehalts möglich werden, als auch eine Untersuchung der Formeffekte von Schneeflocken vorgenommen werden. Ein anderes Beispiel stellen hochgenaue Mikrowellenbeobachtungen im Bereich der Wasserdampfemission dar, mit denen es möglich sein soll, verbesserte Korrekturen für die Satellitenkommunikation und die Astronomie durchzuführen. Die synergetische Nutzung von Mikrowellenradiometern, Wolkenradar und Lidar hat ein großes Potential, den Atmosphärenzustand (Temperatur- und Feuchteprofile sowie Wolkenparameter) genau zu erfassen. Kontinuierliche Messungen dieser Geräte an sogenannten Ankerstationen wie z. B. Cabauw und Lindenberg, zusammen mit ausgefeilten Auswertealgorithmen (**I**ntegrated **P**rofiling **T**echnique, IPT), erlauben so erstmals eine statistische Untersuchung über das Auftreten von Parametern wie dem Flüssigwassergehalt. Diese Arbeiten werden in enger Kooperation mit internationalen Partnern wie der Universität Reading, der



Abb. 3: Beispiele für experimentelle Arbeiten des Instituts aus der Geophysik (a): Radiomagnetotellurik zur Flacherkundung) und Meteorologie (b): Kalibration eines Mikrowellenradiometers an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus).

TU Delft und dem KNMI durchgeführt. Die IPT erlaubt die direkte Nutzung der Fernerkundungsdaten für die Evaluierung von prognostischen Modellvariablen. Dies wird in der Arbeitsgruppe insbesondere für das **L**okal-**M**odell **K**ürzestfrist (früher LMK, jetzt COSMO-DE) des DWD durchgeführt. Hier bildet das Jahr 2007 mit der **G**eneral **O**bservation **P**eriod (GOP, siehe: gop.meteo.uni-koeln.de) ein Highlight, da hier eine Vielzahl von Daten (Regenmesser, Radar, Satelliten, GPS, usw.) zusammengetragen wird.

Die Arbeitsgruppe für „Integrierte Numerische Modellierung“ von Yaping Shao befindet sich derzeit im

Aufbau. Der Schwerpunkt dieser Gruppe liegt in der Modellierung und Parametrisierung der Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Erdsystems und der dazugehörigen dynamischen Prozesse und Konsequenzen. Es wird versucht, Modellsysteme aufzubauen, die die Integration der multi-disziplinären Facherkenntnisse sowie die Verbindung von Prozessen und Daten mit Modellen ermöglichen. Durch Anwendung des integrierten Modellsystems auf bisher unerforschte Fachbereiche sollen neue Erkenntnisse gewonnen werden. Dazu gehört zum Beispiel die Simulation der Staubflüsse in Nordafrika, Asien und Australien. Ein integriertes Modell hat hier die Quantifizierung des vollständigen Prozesses der Bewegung der Staubteilchen ermöglicht. Die numerischen Ergebnisse konnten mit Bodenbeobachtungen und Satellitendaten validiert werden. In Zukunft soll die Grundlagenforschung an den Austauschprozessen zwischen Atmosphäre und Erdboden, insbesondere Landoberfläche und Ozeanoberfläche, verstärkt werden. Ein Beispiel dafür ist die Forschung über den skalenabhängigen Austausch von Energie über komplexen Landoberflächen. In diesem Fall wurden detaillierte numerische Experimente durchgeführt und die numerischen Ergebnisse zusammengefasst. Es ist geplant, für die nächsten Jahre ein neues Landoberflächenschema zu entwickeln, das die skalenabhängigen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Landoberfläche realistisch beschreibt.

In einem weiteren Arbeitsschwerpunkt werden die Kompetenzen des Institutes im Bereich Energiemeteorologie in einer neuen Arbeitsgruppe für „Renewable Energy Research and Application" zusammengefasst. Die wesentliche Aufgabe der Gruppe besteht in der Vernetzung von Forschung und industrieller Anwendung auf diesem Gebiet. Hierzu sollen, neben einem umfangreichen Angebot im Bereich Aus- und Weiterbildung, neue interdisziplinäre Forschungsprojekte initiiert werden.

Ein Schwerpunkt der Arbeitsgruppe „Meteorologie und Klimatologie der Tropen und Subtropen" von Andreas Fink liegt in der Diagnose groß- bis mesoskaliger Prozesse in Beobachtungs- und Modelldaten. Als räumlicher Schwerpunkt hat sich in den letzten Jahren der afrikanische Sektor der Tropen herausgebildet. Die Forschungen zu den synoptischen und dynamischen Aspekten extremer, oft zeitlich simultaner Niederschlagsereignisse nördlich und südlich der Sahara sowie der teilweise damit verbundenen, großräumigen Staubstürme leisten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis tropisch-extratropischer Wechselwirkungen und der Hydrologie der Region. Mit Blick auf die sehr stark ausgeprägte dekadische Niederschlagsvariabilität im sub-saharischen Westafrika wurden Arbeiten zur Klassifizierung von Niederschlagsereignissen des westafrikanischen Monsuns einschließlich diverser Fallstudien zu mesoskaligen konvektiven Systemen durchgeführt.

Ein Aspekt betraf die Rolle untertroposphärischer, afrikanischer Wellenstörungen für die Auslösung und Aufrechterhaltung hoch organisierter Konvektionssysteme, unter denen die Böenlinien der bekannteste Vertreter sind. Weiterhin leistet die Arbeitsgruppe Beiträge zum Verständnis des rezenten Klimas sowie der vergangenen und zukünftigen Klimaentwicklung Afrikas. Die genannten Arbeiten nutzen eine Kombination von teilweise unabhängigen Beobachtungsdatensätzen. Neben Satelliten- und atmosphärischen Reanalysedaten unterhält die Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit mit verschiedenen europäischen und afrikanischen Forschungsinstitutionen und Wetterdiensten einige in-situ Messnetze. Darunter sind ein hydrometeorologisches Beobachtungsnetz in Benin und drei neue Radiosondenstationen in Ghana, Benin und Nigeria.

Diese Aktivitäten sind zusammen mit der Vor-Ort-Akquirierung historischer Datensätze sehr aufwändig, doch für die Beschreibung von Wetter- und Klimaprozessen in dieser datenarmen Region unerlässlich. Die Wiedergabe der relevanten Klimaprozesse in globalen und regionalen Klimamodellen rundet den Forschungsschwerpunkt „Westafrikanischer Monsun" ab. Dieser, wie auch frühere Arbeiten und weitere Projekte, unterstreicht die Expertise der Arbeitsgruppe auf dem Gebiet der Verknüpfung experimenteller und beobachtungsnaher Daten mit theoretischen Vorstellungen von Wetter- und Klimaprozessen.

Die Arbeitsgruppe von Joachim Saur beschäftigt sich mit der Geophysik des Weltraumes und der Planeten unseres Sonnensystems. Insbesondere sind dabei die planetaren Monde, deren Anzahl pro Mutterplanet im äußeren Sonnensystem groß ist, von besonderem Interesse. Wichtige Forschungsgegenstände in diesem Bereich sind die Atmosphären der Monde und der innere Aufbau der Monde. Ein besonders aktuelles Thema ist hierbei die Suche nach flüssigem Wasser, das als notwendige Voraussetzung für mögliches extraterrestrisches Leben erachtet wird. Sowohl beim Jupitermond Europa als auch beim Saturnmond Enceladus gibt es starke Hinweise auf einen augenblicklich flüssigen Ozean unter der gefrorenen Eisoberfläche beider Monde.

Von großem Interesse sind auch die Mondatmosphären und deren Wechselwirkung mit dem sie umgebenden Plasma. Im Gegensatz zum Erdmond besitzen viele andere Monde in unserem Sonnensystem Atmosphären und sitzen gleichzeitig innerhalb des magnetosphärischen Plasmas ihres Mutterplaneten. Die Eigenschaften dieser Atmosphären weisen ein großes Spektrum an Variabilität auf. So findet man zum Beispiel bei Titan einen Oberflächendruck von 1,5 bar und bei Europa nur etwa 10^{-10} bar.

Ein weiteres Interessenfeld der Weltraumgruppe ist die Turbulenz in extraterrestrischen Medien und

das Entstehen von Polarlichtern. Im Gegensatz zu hydrodynamischen Strömungen handelt es sich im Weltraum sehr oft um Strömungen von Plasmen, bei denen zusätzlich zu den gewöhnlichen Fluidkräften die elektromagnetischen Kräfte eine zentrale Rolle spielen. Diese Plasmaströmungen sind ähnlich den hydrodynamischen Strömungen oft turbulent. Eigenschaften der Turbulenz haben wichtige Auswirkungen auf Transportprozesse in der Extraterrestrik. Von besonderem Interesse für die Kölner Gruppe ist die Frage, welche Auswirkungen turbulente Strömungen in den planetaren Magnetosphären auf die Entstehung und Morphologie der planetaren Polarlichter (Abb. 4) haben.

Die Arbeitsweise ist meist theoretisch, d. h. es werden numerische Simulationen und gelegentlich auch analytischen Rechnungen durchgeführt. Diese Studien sind sehr oft eng an Beobachtungsdaten von Raumsonden der NASA oder ESA oder an erdgebundenen Beobachtungen orientiert. Die Arbeitsgruppe ist an einigen Beobachtungen auch direkt beteiligt, wie z. B. an einer zukünftigen Mission zu Jupiter, genannt JUNO, die im polaren Orbit den inneren Aufbau von Jupiter und seine Polarlichter untersuchen soll, oder an Messkampagnen mit dem Hubble Space Telescope, das sich im Erdorbit befindet.

Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe Angewandte Geophysik von Bülent Tezkan im Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln, ist die Weiterentwicklung der elektrischen und elektromagnetischen Methoden der Angewandten Geophysik. Diese Methoden werden angewandt auf die Problemstellungen der Ingenieur-, Umwelt- und Hydrogeophysik (Deponie- und Altlastenerkundung, Grundwasserprospektion, Archäologie) und auf die Erkundung tiefer liegender Strukturen in der Erde (Erdölprospektion, Geothermie, Lagerstättenerkundung, Krustenstudien). Insbesondere in der Weiterentwicklung von zwei innovativen EM-Methoden ist die Arbeitsgruppe in Deutschland und Europa führend. Bei der Long-offset transient elektromagnetic (LOTEM)-Methode wird mit einem Sender elektrischer Strom in die Erde eingespeist, der in regelmäßigen Abständen umgepolt wird.

Das abrupte Umschalten erzeugt Induktionsströme, die sich in den Untergrund ausbreiten und elektromagnetische Felder erzeugen, welche auf der Oberfläche gemessen werden. Aus den Messungen lässt sich die elektrische Leitfähigkeit bis zu 10 km Tiefe bestimmen. Bei der Radiomagnetotellurikmethode (Abb. 3a) werden die von militärischen und zivilen Rundfunksendern erzeugten elektrischen und magnetischen Felder im Frequenzbereich von 10 kHz bis 1 MHz gemessen. Die Verwendung von mehreren Frequenzen ermöglicht die zerstörungsfreie Sondierung des oberflächennahen Untergrundes. Die maximale Aussagetiefe für diese Methode ist einige Dekameter. Der Schwerpunkt der Anwendung dieser Methode liegt im Bereich der Umweltforschung. Diese thematische Orientierung und die Weiterentwicklung der Methode nehmen in der Arbeitsgruppe einen besonderen Stellenwert ein und wurden auch bereits mit dem Umweltpreis der Stadt Köln honoriert. Die Forschungsprojekte der Arbeitsgruppe wurden von der EU, dem BMBF und der DFG gefördert.

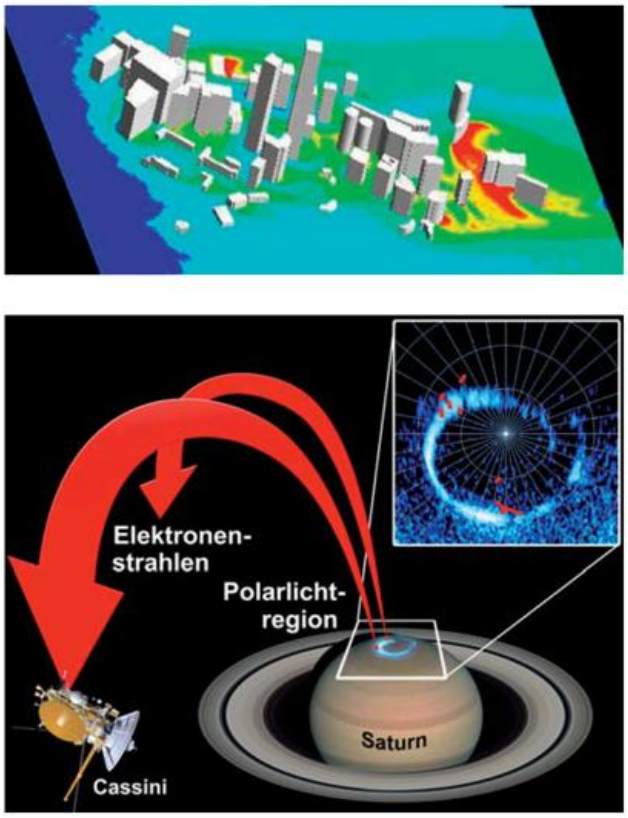


Abb. 4: (a) Numerische Simulation von Schadstoffausbreitung in einer Stadt. Gegenden mit hoher Konzentration sind rot gefärbt, während Gegenden mit niedriger Konzentration blau gefärbt sind. (b) Illustration aus der Weltraumgeophysik: Beschleunigung von Polarlichtelektronen vom Saturn weg.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Susanne Crewell
HD Dr. Andreas Fink
Prof. Dr. Michael Kerschgens
Prof. Dr. Joachim Saur
Prof. Dr. Yaping Shao
Prof. Dr. Bülent Tezkan
Institut für Geophysik und Meteorologie Universität zu Köln
Sekretariat Geophysik
Sekretariat Meteorologie
Zülpicher Str. 49a
50674 Köln
Kerpener Str. 13
50937 Köln

sekretar@geo.uni-koeln.de
sek@meteo.uni-koeln.de
Internet-Homepage:
www.uni-koeln.de/math-nat-fak/geomet/

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 167-172 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

H.-J. BOLLE

Fritz Möller 1906 - 1983



Vor 101 Jahren, am 16. Mai 1906, wurde Professor Dr. Fritz (Georg Herman) Möller geboren, der, besonders zu Beginn des Zeitalters der meteorologischen Forschung mit Satelliten und der physikalisch ausgerichteten Klimaforschung, die Entwicklung der Meteorologie nicht nur in Deutschland entscheidend mitgestaltet hat. Es scheint daher angebracht, sich seines Wirkens, insbesondere als Direktor des Meteorologischen Institutes der Ludwig-Maximilians-Universität (1960 - 1972), zu erinnern.

Fritz Möller wurde in Rudolstadt, Thüringen, als Sohn eines Arztes geboren. Seiner Verbundenheit mit dieser thüringischen Heimat war es wohl zu verdanken, dass er alles tat, um nach der deutschen Teilung den Kontakt mit Freunden und Kollegen im Osten Deutschlands aufrecht zu erhalten. Er studierte zunächst Mathematik, Physik und Geophysik in Jena (1924-1926) und Göttingen (1926-1927), um sich dann, in Frankfurt a. M., der Meteorologie zuzuwenden (1927-1928). Er erlangte seinen Doktor der Philosophie mit einer Arbeit über "Statistische Untersuchungen über die Konstanz der Luftkörper"[1]. Anschließend arbeitete er als Wissenschaftlicher Assistent unter Prof. Dr. Franz Linke, Prof. Dr. Georg Stüve und Prof. Dr. Ratje Mügge an der Universität Frankfurt (1929-1933), wo zu dieser Zeit eine der wichtigsten Zentren meteorologischer Forschung in Deutschland angesiedelt war. Gemeinsam mit Mügge veröffentlichte er die zukunftsweisende Arbeit „Zur Berechnung von Strahlungsströmen und Temperaturänderungen in Atmosphären von beliebigem Aufbau"[2]. Er habilitierte sich 1934 mit der Arbeit über „Energetische Klimatologie. Zum Wärmehaushalt der Atmosphäre"[3].

1934/35 arbeitete er für kurze Zeit als Meteorologe am Flughafen Frankfurt a. M. Anschließend wechselte er in das Referat „Aerologie und Theoretische Meteorologie" des Reichsamtes für Wetterdienst nach Berlin, um aber 1938 als Dozent und Observator nach Frankfurt zurückzukehren. Diese Stellung, die er bis 1948 innehatte, bekleidete er zeitweilig auch in Leipzig. Während des Krieges wurde er als Dozent eingesetzt und bildete unter anderem während kurzer Lehrgänge Meteorologen aus, unter denen sich auch namhafte Wissenschaftler anderer Fakultäten befanden. In diese Zeit fällt die Entwicklung des berühmten Strahlungsdiagramms für die Berechnung des infraroten Strahlungsflusses in der Atmosphäre[4]. Außerdem entsteht während dieser Zeit der Beitrag „Luftbewegung" zum Hann-Süring Lehrbuch der Meteorologie[5], ein Leitfaden für den Gebrauch in der Wetterdienstschule, und gemeinsam mit Linke der Beitrag „Langwellige Strahlungsströme in der Atmosphäre und die Strahlungsbilanz" zum Handbuch der Geophysik[6].

Nach dem Kriege wurde das Frankfurter Institut zeitweilig nach Darmstadt verlegt. Möller arbeitete auch am U. S. Weather Center des Rhein-Main Flughafens (1947-1948). Er schrieb während dieser Zeit die Kapitel „Vertikalbewegungen in der Atmosphäre", „Strahlung und Licht" sowie „Thermodynamik und Physik der Wolken" für die „FIAT[7]-Reviews of German Science 1939-1946", in denen die wissenschaftlichen Tätigkeiten in Deutschland während des Krieges zusammengefasst wurden.

1948 wird Fritz Möller als Extraordinarius an die neu gegründete Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz berufen und 1949 zum Ordinarius für Meteorologie und Geophysik bestellt. Hier beginnt eine einzigartig produktive, breit gefächerte, wissenschaftliche Aktivität, die von einer Arbeit über den „geheimnisvollen Kugelblitz"[8] (1949) über „Die Temperatur der Mondoberfläche"[9] bis zu den für die einsetzende Klimaforschung Bahn brechenden, zum Teil in den USA durchgeführten Arbeiten mit S. Manabe führte: „Über das

1 *Gerlands Beitr. Geoph.* **21**, 387-435 (1929)
2 *Z. Geophys.* **8**, 53-64 (1932)
3 *Gerl. Beitr. Geophys.* **42**, 252-278 (1934)
4 Das Strahlungsdiagramm, Reichsamt für Wetterdienst, Berlin (1944)
5 Hann-Süring, Lehrbuch der Meteorologie, 5. Auflage, 491-578 und 591-671, Leipzig (1940)
6 Handbuch der Geophysik 8, 651-721, Berlin (1944), Hrsg. F. Linke, *Verlag Gebr. Borntträger*, Berlin-Zehlendorf
7 **F**ield **I**ntelligence **A**gency of **T**echnology
8 Der geheimnisvolle Kugelblitz. *Umschau* **49**, 458 (1948); Was ist ein Kugelblitz? *Kosmos* **47**, 86-87 (1951)
9 Die Temperatur der Mondoberfläche. *Z. f. Meteorol.* **5**, 185-189 (1951) und **6**, 148 (1952)

Strahlungsgleichgewicht der Atmosphäre“[10] und „On the radiative equilibrum and heat balance of the atmosphere“[11]. Die im Rahmen dieser Arbeiten durchgeführten Parametrisierungen ermöglichten es der Arbeitsgruppe um J. Smagorinsky und S. Manabe, die Strahlung zum ersten Mal in ein allgemeines atmosphärisches Zirkulationsmodell einzuführen. Gemeinsam mit Kurt Bullrich und Elisabeth de Bary, die zu einem sehr frühen Zeitpunkt in das Institut eintraten, werden die „Farbe des Himmels“[12] und die Streu- und Absorptionsvorgänge in der Atmosphäre erforscht und dafür - mit aus heutiger Sicht unvorstellbar primitiven Rechengeräten - Berechnungen der Mie-Streuung und Mehrfachstreuung durchgeführt. Umfangreiche, teilweise von Wetterfliegern während des Krieges gewonnene Daten über die Wolkenverteilung werden ausgewertet[13] und die Strahlungseigenschaften der Wolken untersucht. Die Breite des Arbeitsgebietes wird auch durch Arbeiten zur Gebietsverdunstung[14], zum horizontalen Großaustausch über dem Atlantik[15] und die



Abb. 2: Von links: Julius London, derzeit Präsident der Internationalen Strahlungskommission, Fritz Möller, Christian Junge und Edward Martell während des Internationalen Strahlungssymposiums in Garmisch-Partenkirchen 1976. Junge war zu der Zeit Präsident von IAMAP, Martell Präsident der ICACGP (Kommission für Atmosphärenchemie und globale Luftverunreinigung).

[10] *Z. f. Meteorologie* **15**, 3-8 (1961)

[11] *Monthly Weather Review* **89**, 503-532 (1961)

[12] Gemeinsam mit K. Bullrich und E. De Bary: Die Farbe des Himmels. *Geof. pura e appl.* **23**, 69-110 (1952); Über die Farbe der Sicht und des Tageshimmels. *Archiv. Met. Geophys. Bioklim.* **B5**,1-17 (1953); mit E. De Bary und G. Krog: Die Farbe des Himmels II. *Geophys. pura e appl.* **26**, 141-152 (1953)

[13] Gemeinsam mit E. de Bary: Über die Höhenverteilung der Wolken bei verschiedenen Wetterlagen. *Met. Rundschau* **9**, 130-134 (1956)

[14] Z. B.: Bestimmung der Landesverdunstung durch Großaustausch. *Ann. d. Meteor.* **4**, 157-160 (1951); Zur Bestimmung der Gebietsverdunstung aus der Advektion. *Ber. d. Dtsch. Wetterd. US-Zone* **35**, 172-173 (1952)

[15] Eine Berechnung des horizontalen Großaustausches über dem Atlantischen Ozean, *Archiv Meteor. Geophys. Bioklim.*, **A2**, 73-81 (1950); Die Aufrechterhaltung der Westdrift durch Großaustausch. *Ber. d. Deutschen Wetterdienstes d. US-Zone* **35**, 135-138 (1952)



Abb. 3: F. Möller, K. Feussner, H. Hinzpeter, H. Lossnitzer und K. Bullrich im Gespräch während des Strahlungsseminars in München, 19. - 20. März 1964.

„Vierteljahreskarten des Niederschlages für die ganze Erde“[16] dokumentiert. Das Institut vergrößerte sich laufend: Friedrich Volz (optische Eigenschaften des Aerosols), Hans-Günther Korb, J. Michalowsky (Absorption der Sonnenstrahlung in der wolkenfreien und bewölkten Atmosphäre), Gerhard Manier (Wärmebilanz der atmosphärischen Grenzschicht) und Wilford G. Zdunkowski (Berechnungsmethoden für langwellige Strahlungsflüsse) kommen hinzu. Bernhard Haurwitz kam als Gast. Schließlich wurde die Arbeitsgruppe durch drei Schüler von Prof. Dr. Rudolf Schulze[17] ergänzt: Fritz Kasten (Sichtweite, Luftmassenbestimmung), Hans-Jürgen Bolle (Spektroskopie der atmosphärischen Strahlung), und Heinrich Quenzel (optische Wasserdampfbestimmung). Möller widmete sich während seiner Mainzer Zeit auch dem Geophysikalischen Jahr, organisierte für die WMO internationale Strahlungsvergleiche[18] und schrieb eine Reihe von Artikeln für Bücher und Handbücher[19]. 1957-67 war er Präsident der Internationalen Strahlungskommission der IAMAP (jetzt IAMAS), IUGG, der er zuvor (1954-1957) als Sekretär diente. Sein Nachfolger in beiden Ämtern war Prof. Dr. Julius London aus Boulder, USA.

[16] Vierteljahreskarten des Niederschlages für die ganze Erde. *Petermanns Mitt.* **95**, 1-7 (1951)

[17] Prof. Dr. Rudolf Schulze war der Direktor des Meteorologischen Observatoriums Hamburg des DWD, das aus der Abteilung Forschung und Entwicklung im damaligen Meteorologischen Amt für Nordwestdeutschland hervorging. Er wurde in Mügeln bei Dresden im gleichen Jahre wie Fritz Möller am 13. Mai 1906 geboren; er starb am 16. Juli 1974. Schulze war Gastgeber für die von Möller initiierten Strahlungsvergleichsmessungen an der auch mehrere Wissenschaftler aus der DDR teilnahmen. Sein Nachfolger in Hamburg wurde Fritz Kasten.

[18] Radiation comparisons at Hamburg. *WMO Bulletin* 13-15 (1957)

[19] Long wave radiation (36-39) und Thermodynamics of clouds (199-206). Compendium of Meteorology, Boston (1951); Meteorologie. Stichworte im Kosmos-Lexikon. Stuttgart (1951-1954); mit Christian Junge: “Spezielle Bestandteile der Luft”, *Landolt-Börnstein*, Zahlenwerte und Funktionen, Berlin (1952); Teile von Kapitel 3 in N. Robinson (1966) “Solar Radiation”, *Elsevier Publishing Company*, N. Y.; mit F. Baur: “Allgemeine physikalische und geophysikalische Tabellen” in Linkes Meteorologisches Taschenbuch, Neue Ausgabe, Leipzig (1970) ; “Strahlung in der unteren Atmosphäre” in Handbuch der Physik, *Springer*, Berlin (1957)

1960 bekam Fritz Möller den Ruf an die Ludwig-Maximilians-Universität München als Nachfolger von Prof. Dr. Rudolf Geiger[20]. Dies wurde ein bedeutender Einschnitt in seinem Lebenslauf: Auf Grund seiner außerordentlichen Forschungstätigkeit in Mainz und seiner mittlerweile engen Kontakte zu amerikanischen Kollegen in der Meteorologie und der Weltraumforschung begann für ihn neben einem umfangreichen Ausbau des Münchener Institutes mit zeitweilig bis zu sechs Außenstellen eine intensive Tätigkeit in nationalen und internationalen Gremien. Er wurde in den Wissenschaftlichen Beirat des DWD berufen, und wurde Mitglied des Landesausschusses der Internationalen Glaziologischen Grönlandexpedition, Gutachter der DFG, Mitglied der DFG-Kommissionen für Radiometeorologie, Forschungsschiff, Weltraumforschung und der Senatskommission für Ozeanographie, sowie Mitglied des Vorstandsrates des Deutschen Museums in München. 1962 war er Mitglied der Beratergruppe C, Meteorologie, der vorbereitenden Kommission für europäische Weltraumfahrt, Sektionsleiter der Deutschen Union für Geophysik und Geodäsie und Mitglied der DFG-Kommission für das Jahr der ruhigen Sonne (IQSY). Er unternahm zwei längere Reisen in die USA. 1963 wurde Möller für drei Jahre zum Präsidenten der Deutschen Union für Geophysik und Geodäsie gewählt und wurde Mitglied im Arbeitskreis der Deutschen Kommission für Weltraumforschung beim damaligen BMwF.



Abb. 4: F. Möller mit K. Kondratyev und J. Grunow im DWD Observatorium Hohenpeißenberg.

Als Reaktion auf die von G. N. Plass 1956 begonnene Diskussion um „Carbon Dioxide Theory of Climate Change“[21] reagierte Möller 1963 mit dem Aufsatz „On the influence of changes in the CO_2 concentration in air on the radiation balance of the earth's surface and on climate“[22]. Da er und Korb sich viel mit den physikalischen Eigenschaften von Wolken beschäftigt hatten, berechnete er auch den Einfluss von Wolken auf das Klima und wies nach, dass eine geringfügige Erhöhung der Bewölkung den CO_2-Effekt kompensieren könnte. Dies führte dazu, dass in der Folge der Rolle der Wolken im Klimasystem mehr Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Im gleichen Jahr veröffentlichte er auch den Aufsatz „The vertical distribution of clouds“[23].

Am 15. Oktober 1963[24] wurde in München die Meteorologische Gesellschaft München gegründet, zu deren erstem Vorsitzenden Möller gewählt wurde. Es war jedoch sein Herzensanliegen, den Kontakt zu den Kollegen in der DDR nicht abbrechen zu lassen. So kämpfte er gemeinsam mit dem Direktor des Meteorologischen Dienstes der DDR, Horst Philipps[25], für die Erhaltung gemeinsamer Strukturen. Auf Betreiben Möllers und Philipps vereinbarten die Vorsitzenden der drei meteorologischen Gesellschaften in Westdeutschland gemeinsam mit der Meteorologischen Gesellschaft in der DDR den **V**erband **D**eutscher **M**eteorologischer **G**esellschaften (VDMG) zu gründen, deren erster Vorsitzender ebenfalls Möller wurde. Nachdem dieser Verband schließlich doch aus politischen Gründen auseinander brach, wurde am 27. März 1974 schließlich die Deutsche Meteorologische Gesellschaft gegründet.

Im März 1964 lud Möller eine Reihe bekannter deutscher Forscher zu einem Strahlungssymposium nach München ein[26]. Im Laufe dieses Jahres wurde er Obmann der Sektion Geophysik und Senator der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina in Halle sowie Mitglied und Vorsitzender der Kommission

[20] Die Meteorologie hat eine lange Tradition in Bayern. 1803 erschien das Lehrbuch Meteorologie „zum Gebrauche bey seinen Vorlesungen entworfen von Gabriel Knogler, Benediktiner in Scheyern, und Professor an der kurfürstl. Baier'schen Landesuniversität - Mit Censurfreyheit der kurfürstl. Landesuniversität". Knogler wurde 1794 Professor an der Universität Ingolstadt, wurde dort 1798-1799 Rector magnificus und leitete bei der Verlegung der Universität nach Landshut deren Neubau. An dieser Vorgängerin der Ludwig-Maximilians Universität war er Professor der Meteorologie, der juristischen und höheren Mathematik, der physisch-mathematischen Geographie und Astronomie bis er mit 47 Jahren 1806 seine Professur aufgab, um Pfarrer zu werden. In der Einleitung zu seinem Buch schreibt er unter anderem: „Auf die Frage, ob die Meteorologie wohl auch einen Nutzen verschaffe, läßt sich kurz, doch hinlänglich antworten a) dass sie eigentlich Physik, und zwar Physik der Atmosphäre sey. Die Vorteile, die man sich also von der Physik überhaupt versprechen kann, darf man sich von der Meteorologie um so eher erwarten, als sich diese b) mit der uns in jeder Hinsicht höchst wichtigen Untersuchung beschäftigt, ob, und welchen Einfluß die Witterung auf die Vegetation der Pflanzen und das Wohlbefinden unseres Körpers habe." Diesen Hinweis verdankt der Verfasser Herrn Prof. em. Dr. Gustav Hofmann.

[21] G. N. Plass: The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change. *Tellus* **8** (2), 140-154 (1956)

[22] *J. Geophys. Res.* **68**, 3866-3877 (1963)

[23] *J. Appl. Met.* **2**, 806-808 (1963)

[24] Zu dieser Zeit bestanden bereits Meteorologische Gesellschaften in Frankfurt („Zweigverein Frankfurt der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft", seit 1956) und Hamburg („Meteorologische Gesellschaft in Hamburg")

[25] 1963 widmete Möller Horst Philipps einen langen Nachruf: *Gerlands Beiträge zur Geophysik* **72**, 139-148

[26] *Met. Rundschau* **17**, 126 (1964)

für Glaziologie bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Als Präsident der Internationalen Strahlungskommission war er auch verantwortlich für die Ausrichtung des Strahlungssymposiums in dem damaligen Leningrad, 1964, die er gemeinsam mit Prof. Kirill Kondratyev, dem späteren Rektor der Universität Leningrad, organisierte. Auf Einladung Möllers war Kondratyev bereits 1962 zu einem längeren Besuch in München. So erweiterten sich seine zunächst in Amerika angeknüpften freundschaftlichen Beziehungen auch nach Osten und er sorgte nicht nur im innerdeutschen sondern auch im internationalen Rahmen für Gedankenaustausch und Kooperation, was eine seiner markantesten Charaktereigenschaften war. Mit Kondratyev in dem späteren St. Petersburg und Julius London in Boulder verband ihn eine lebenslange enge Freundschaft. Der Präsident der Miyagi Universität in Sendai, Prof. Giichi Yamamoto, wurde sein Partner in Japan. Sowohl Kondratyev als auch Yamamoto haben unabhängig voneinander ähnliche Strahlungsdiagramme entwickelt wie Möller.

1965 trafen sich am Rande eines COSPAR Space Science Symposiums in Mar del Plata 12 Wissenschaftler (genannt „die zwölf Weisen") aus allen Erdteilen, unter ihnen Fritz Möller, um ein sich auf Satellitendaten stützendes internationales Forschungsprogramm zur Verbesserung der Wettervorhersage auf den Weg zu bringen. Daraus ging das **J**oint **O**rganizing **C**ommittee (JOC) für das 1967 begonnene **G**lobal **A**tmospheric **R**esearch **P**rogram (GARP) hervor, in dem Möller von 1968 bis 1971 Mitglied war und für das er unter anderem das erste Strahlungs-Unterprogramm entwickelte. Eine der Sitzungen des JOC fand in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften statt. Auch wurde er Vorsitzender der ad hoc Gruppe Atmosphäre bei der ESRO und Mitglied der Deutschen Gesellschaft für Raketentechnik und Raumfahrt. Erste Besprechungen über einen europäischen Wetter-Satelliten der meteorologischen Dienste wurden bei der ESRO am 5.10.1967 geführt. In diesem Jahr, am 7. Juli 1967, wurde Möller Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften sowie Mitglied deren Kommission für Geodäsie und Geophysik. 1971 erhielt er die Ehrendoktorwürde der Universität Mainz und wurde auch mit dem Wetterdienst-Preis des Verkehrsministers ausgezeichnet.

Während der letzten Dienstjahre veröffentlichte Möller mehrere Aufsätze über die Nutzung von Satellitendaten, mehrfach gemeinsam mit Ehrhard Raschke. Unter anderem 1967 „Eine Karte der Strahlungsbilanz des Systems Erde-Atmosphäre für einen 14-tägigen Zeitraum"[27]. Seiner weiterhin engen Verbundenheit mit den ostdeutschen Kollegen gab er 1969 dadurch Ausdruck, dass er der Festschrift zum 75. Bestehen des Meteorologischen Observatoriums Potsdam (1892-1967) den Aufsatz „Entwicklungslinien in der meteorologischen Strahlungsforschung" beisteuerte.



Abb. 5: JOC Sitzung in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften um 1971/1972. Stehend zweiter von links Warren Goodson, Klaus Hasselmann, G. B. Tucker, Morris Tepper, Pierre Morel, Verner Suomi, Valentin Meleshko, Joseph Smagorinsky, Robert M. Stewart, Bert Bolin, Pisharoth R. Pisharoty, Bo Döös, A. M. Oboukhov, Viktor A. Bugaev, dahinter, halb verdeckt, Stan Ruttenberg. Kniend: zweiter von links Arnold Glaser (?), dritter von links J. S. Sawyer, zweiter von rechts Joachim Kuettner, ganz rechts Fritz Möller. Unter den nicht identifizierten Teilnehmern könnten K. Gambo, Fred Shuman und E. M. Dobryshman sein.

1969 wurde er in das Goddard Space Flight Center eingeladen, wo die Vorbereitungen für den Start des Nimbus B2 Satelliten getroffen wurden, der für den 1. Mai angesetzt war. In einem langen, handgeschriebenen Brief berichtet er am 4. Februar 1969 nach München über die Pläne zur Verifikation der Messungen mit dem IRIS Instrument durch Messungen vom Boden und Ballons aus, über die Vorbereitungen für die Mars Mission 1971 und über die Entwicklung neuer Auswertungsverfahren (Inversionsmethoden). Von mehreren Seiten wurde er eingeladen, sich mit seinem Institut an diesen Projekten zu beteiligen[28]. 1971 fasste Möller noch einmal die „Developments in space meteorology during 1969/1970" zusammen[29]. Seine wohl letzte von nahezu 200 Veröffentlichungen einschließlich Forschungsberichten datiert aus dem Jahre 1972 und ist gemeinsam mit Heinrich Quenzel verfasst: „Über die Wechselwirkung zwischen Bodenreflexionsvermögen und Himmelshelligkeit".[30]

1972 emeritierte er von der Ludwig-Maximilians-Universität. Im gleichen Jahre wurde er Ehrenmitglied der American Meteorological Society. 1977 wurde er mit der Alfred Wegener Medaille der DMG geehrt. Nach längerer Krankheit starb Fritz Möller am 21. März 1983. In München hatte er von Geiger ein Institut

[27] *Met. Rundschau* **20**, 97-98 (1967)

[28] Die in München begonnenen instrumentellen Entwicklungen kamen aber erst viel später mit dem von Herbert Fischer in Karlsruhe entwickelten MIPAS Instrument für den europäischen Satelliten ENVISAT zum Tragen.

[29] *Space Research* **XI,** 537-554 (1971)

[30] *Gerlands Beitr.Geophys.* **81**, 407-413 (1972)

übernommen, das sich hauptsächlich durch seine Forschung auf dem Gebiet der atmosphärischen Grenzschicht einen Namen gemacht hatte und das in dem grundlegenden Buch von R. Geiger gipfelte: „Das Klima der bodennahen Luftschicht“[31]. Möller ließ diese Arbeiten von den übernommenen Kollegen weiterführen. Von diesen ging Gustav Hofmann als Ordinarius nach Köln und wurde Möllers Nachfolger in München. Albert Baumgartner erhielt den Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Ludwig-Maximilians-Universität München. Helmut Kraus wurde Direktor des Meteorologischen Instituts der Universität Bonn, Rainer Roth Direktor des Meteorologischen Instituts der Universität Hannover.

Zusätzlich zum Bestand des Meteorologischen Institutes der Universität München gelang es Möller, seine aus Mainz mitgebrachten Arbeitsgebiete in München zu etablieren. Darüber hinaus setzte er die Gründung des Institutes für Theoretische Meteorologie durch, als dessen Vorstand Prof. Dr. Günther Hollmann berufen wurde. Hans-Günther Korb arbeite dort eine zeitlang, bevor er nach Darmstadt übersiedelte. Das Institut wurde nach Hollmanns frühem Tod als Abteilung in das Meteorologische Institut eingegliedert. Wilford Zdunkowski setze seine Arbeiten in München fort und übernahm nach einem mehrjährigen Aufenthalt in Salt Lake City, USA, das Institut in Mainz. E. Raschke kam aus Mainz dazu, hielt die von Möller geknüpften Kontakte mit der NASA aufrecht und analysierte gemeinsam mit Möller die ersten Satellitendaten bis er einen Ruf an die Universität Köln annahm. Später war er an der GKSS in Geesthacht und an der Universität Hamburg tätig. H.-J. Bolle, der 1977 nach Innsbruck berufen wurde (später FU Berlin), und H. Quenzel, der daraufhin dessen Position einnahm, bauten die experimentelle Strahlungsforschung am Institut aus. Franz Fiedler, der 1965 dazukam, wurde 1978 Direktor des Meteorologischen Institutes der Universität (TU) Karlsruhe und zusätzlich 1985 des Institutes für Meteorologie und Klimaforschung am Forschungszentrum Karlsruhe. Viele von Möllers Doktoranden arbeiten heute oder arbeiteten bis zu ihrer Pensionsgrenze an verschiedenen Instituten der Bundesrepublik in der Klima- und Strahlungsforschung. Mehrere von ihnen gingen zur Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, mit der stets ein sehr enger Kontakt gehalten wurde. Herbert Fischer folgte Fiedler 1986 nach Karlsruhe und wurde zweiter Direktor des Institutes für Meteorologie und Klimaforschung am Forschungszentrum Karlsruhe sowie Professor an der Universität (TU) Karlsruhe. Er übertrug die in München begonnene Entwicklung von Satelliteninstrumenten an das dortige Forschungszentrum Karlsruhe der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren. Auch als derzeitiger Vorsitzender der DMG steht er in der Tradition Möllers. Hartmut Grassl wurde Direktor des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg und Direktor des Welt Klima Forschungsprogramms der WMO. Irmhild Tannhäuser wurde Referentin im Forschungsministerium und trug in dieser Position nicht unwesentlich dazu bei, dass das Deutsche Klimarechenzentrum in Hamburg mit einem der damals modernste Rechner ausgestattet wurde. Um die achtziger Jahre waren daher mehrere wichtige meteorologische Positionen in Deutschland von Möllers ehemaligen Mitarbeitern und Schülern besetzt. Das zeigt, wie intensiv er sich auch um das Fortkommen seiner Mitarbeiter gekümmert hat, die er auch gern zu weiterführenden Studien und Expeditionen ins Ausland schickte. Julius London sagte dazu: „Er war ein stimulierender Lehrer, der eng mit seinen Studenten zusammenarbeitete und viel Verständnis für ihre Nöte hatte. In der Tat betrachtete er seine Studenten als Teil seiner erweiterten Familie.“ Dazu trugen auch häufige Einladungen bei Frau Inge und Fritz Möller bei. Er begründete seine eigene Familie Ende der dreißiger Jahre und hat drei Söhne, Hans, Oskar und Gerhard.



Abb. 6: Inge und Fritz Möller.



Abb. 7: Fritz Möller während einer Exkursion in Hamburg.

Fritz Möller hatte die Weitsicht, als einer der ersten das Potential der Messungen aus dem Weltraum für die Meteorologie zu erkennen und hat dafür gesorgt, dass

[31] *Friedr. Vieweg & Sohn*, Braunschweig (4. Aufl. 1961)

die in den USA gesammelten Erkenntnisse frühzeitig der deutschen Forschung zugängig gemacht wurden. Bereits 1962 veröffentlichte er „Some preliminary evaluations of TIROS II radiation measurements“[32] . Dieser ersten Veröffentlichung von Satellitendaten in der deutschen wissenschaftlichen Literatur sollten viele andere auch seiner Mitarbeiter folgen. 1973 füllte er mit seiner zweibändigen „Einführung in die Meteorologie (Physik der Atmosphäre)“[33] eine bestehende Lücke in der Lehrbuch-Bibliographie aus, indem er physikalische Prozesse in den Vordergrund stellte. Seine grundlegenden Arbeiten über die Strahlungsübertragung in der Atmosphäre bildeten zusammen mit den Ergebnissen anderer Forscher das Fundament für die Klimamodellierung. Durch seine Mitwirkung in vielen internationalen Organisationen wurde er zum Mitgestalter der großen meteorologischen Forschungsprogramme des 20. Jahrhunderts. Trotz der Auswanderungswelle nach dem Kriege, hauptsächlich in die USA, wirkten in Deutschland weiterhin hervorragende Meteorologen an den Universitäten und im Wetterdienst. Fritz Möller jedoch war der Steuermann, der den Nachwuchs in internationale Gewässer lenkte. Wir gedenken heute seiner als eines hervorragenden Wissenschaftlers und auf Ausgleich bedachten, warmherzigen, Menschen, der in der Zeit des Umbruches ganz wesentlich zur Bereicherung der physikalisch ausgerichteten Meteorologie und zur Einbindung der Forschung in Deutschland in das sich mit der Erfindung von Satelliten, der Nutzung elektronischer Rechner und weltumspannenden Forschungsprogrammen dramatisch ändernde internationale Umfeld beigetragen hat.

Diese „historische Notiz“ basiert zum Teil auf schriftlichen Zeugnissen von K. Bullrich, J. London und E. Raschke sowie zusätzlichen Informationen von H. Quenzel, F. Fiedler und H. Fischer.

Adresse:
Prof. Dr. Hans-Jürgen Bolle
Stücklenstraße 18 C
81247 München
hansj.bolle@lrz.badw-muenchen.de

[32] Universität München, Meteorologisches Institut, 15.01.1962, und, in deutscher Übersetzung: *Archiv Meteor., Geophys., Bioklim.* **B12**, 78-94 (1962)

[33] *Bibliographisches Institut* Mannheim/Wien/Zürich, *B.I.-Wissenschaftsverlag*, Band **276** und Band **288** (1973)

promet, Jahrg. 33, Nr.3/4, 173 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

Buchbesprechungen – Neuerscheinungen



Helmut Kraus/ Ulrich Ebel: Risiko Wetter – Die Entstehung von Stürmen und anderen atmosphärischen Gefahren, Springer-Verlag, 2003, 126 Abb., 250 S., Hardcover, 20 €.

Überraschenderweise kommt das Buch nahezu ohne jede Formel aus, selbst im Einleitungs-Kapitel „Einige Grundlagen aus der Meteorologie". Mit meist sehr anschaulichen Abbildungen werden Begriffe wie Luftdruck, Wind, Reibung, Temperaturänderung mit der Höhe, Stabilität der Atmosphäre, Wolkenbildung dargestellt. Nachfolgend wird die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre beschrieben bis hin zum El Nino-Phänomen. Diese ersten 77 Seiten sind eine leicht lesbare Einführung in die Meteorologie.

Mit „Lokale Stürme" folgt das erste Sturmkapitel, das sich den verschiedenen und oftmals zerstörerischen Formen von Gewittern widmet, wobei auch die Wolkenklassifikation und damit die Entstehung von Gewitterwolken erfasst werden. Zahlreiche dazu passende Wolkenfotos sowie aus der Literatur bekannte Darstellungen für Gewitter-, Tornado-, Hagel-, Blitz- und Starkregen-Bildung machen dieses Kapitel sehr anschaulich. Insbesondere die dabei auftretenden Schäden werden erklärt und mit Beispielen belegt.

Selbstverständlich werden auch die schwersten Unwetter, die tropischen Wirbelstürme, erläutert und beschrieben. Sehr aufschlussreich ist die beigefügte Klimatologie über die Häufigkeit und Stärke der Hurrikane (Atlantik-Bereich), die im dargestellten Zeitraum 1944 bis 1996 eine leicht abnehmende Tendenz aufweisen. (Allerdings wird seit 1995 über dem Atlantik eine deutlich über dem Durchschnitt liegende Zahl tropischer Zyklonen und Hurrikane registriert. Davor gab es aber bereits von 1944 bis 1970 eine ähnliche Periode hoher Wirbelsturmaktivität.) Dieses Kapitel enthält umfangreiche und sehr gut belegte Informationen zu tropischen Stürmen.

Auch die oftmals zerstörerischen Stürme unserer mittleren Breiten werden ausführlich, kompetent und sehr anschaulich erklärt und Beispiele beschrieben, z.B. der Weihnachtsorkan LOTHAR, 1999, der Windgeschwindigkeiten erreichte, wie sie sonst nur Tropenstürme aufweisen. Aber auch kleinräumige Stürme (Meso-Zyklonen) werden beschrieben, die im Satellitenbild wie Hurrikane aussehen können: So können bei großem Temperaturunterschied zwischen Ozeanwasser und mittlerer Atmosphäre (im Herbst über dem Mittelmeer, im Winter über dem Nordmeer) kleinräumige Orkane entstehen. Sehr aufschlussreich sind auch Abbildungen, die für die Sturmhäufigkeit und Windstärke (über England, seit 1880) ein großes Auf und Ab zeigen, wobei die zahlreichen Stürme der 1990er Jahre nicht die Häufigkeit der Stürme um 1890 und 1915 erreichen.

Auch Hochwasser in Deutschland haben stark schwankende Häufigkeiten. Als Beispiel wird für die Zeit von 1827 bis 2000 der jeweils höchste Wasserabfluss des Inn/ Bayern in Wasserburg gegeben: Zwischen 1835 und 1855 gab es vier große Hochwasser, dann erst wieder 1899 und 1940, 1985 und 1999, wobei „keinerlei Änderung des mittleren Verhaltens des Hochwasserabflusses vorliegt."

Natürlich sind auch Schnee und Eis große Gefahren, auf die aber nur kurz eingegangen wird. Nicht fehlen darf ein Kapitel, das mit „Risiken bei ‚friedlichem' Wetter" überschrieben ist, womit Schwüle, große Hitze und große Kälte, Nebel, Glätte und Smog gemeint sind. Sie können eher „schleichend" große Schäden verursachen. Allerdings vermisst man ein Kapitel über Medizinmeteorologie und über Freizeitwetter, wo jedoch weniger Risiken zu erwarten sind.

Für viele Anwendungen dürfte das Kapitel „Der Atmosphäre innewohnende Energien" nützlich sein sowie ein kurzer Abriss über „Wetterversicherungen". Selbstverständlich darf dies nicht zu kurz kommen, da der eine Autor (Ebel) bei einer Rückversicherung tätig ist, während beide Autoren jedoch sicher mehr von der Schönheit und Vielfalt der Atmosphäre als von den eventuell auftretenden Schäden fasziniert sind. Sie nehmen ihre Leser sehr erfolgreich mit auf die Reise durch die Atmosphäre und die dabei möglichen Risiken.

Werner Wehry

promet, Jahrg. 33, Nr. 3/4, 174-178 (November 2007)
© Deutscher Wetterdienst 2007

Habilitationen, Promotionen und Diplomhaupt- sowie Master- und Bachelorprüfungen im Jahr 2006

Universität Bayreuth

Promotionen

LIEBETHAL, Claudia: On the determination of the ground heat flux in micrometeorology and its influence on the energy balance closure.

MAUDER, Matthias: Quality assurance for eddy covariance measurements of turbulent fluxes and its influence on the energy balance closure problem.

Diplom-Hauptprüfungen

LASSLOP, Gitta: Bestimmung turbulenter Flüsse über Gras auf der Basis von Laser-Scintillometer-Messungen.

KRACHER, Daniela: Behandlung der Energiebilanzgleichung in drei verschiedenen SVAT-Modellen.

STAUDT, Katharina: Determination of the atmospheric boundary layer height in complex terrain during SALSA 2005.

Freie Universität Berlin

Promotionen

HÜNERBEIN, Anja: Fernerkundung des solaren, aufwärts gerichteten Strahungsflusses über Wolken mit räumlich hoch aufgelösten Satellitenmessungen.

MENDROK, Jana: Das Modell SARTre für Strahlungstransfersimulationen in sphärischen Atmosphären und seine Anwendung zur Ableitung von Zirruswolkeneigenschaften (The SARTre model for radiative transfer in spherical atmospheres and its application to the derivation of cirrus cloud properties).

Diplom-Hauptprüfungen

BEHRENDT, Ingmar: Untersuchung zur Homogenität der Niederschlagsreihe von Berlin-Dahlem mit Hilfe von objektiv statistischen Mitteln.

BÄHR, Norina: Ein statistisches Verfahren zur Bestimmung von festem und flüssigem Niederschlag aus bodennahen Messwerten am Beispiel Berlin-Dahlem.

DAHL, Johannes: The supercell: its dynamics, the weather associated with it, its prediction and occurrence in "classical" and synoptically-unconspicuous environments.

DONAT, Markus: Simulation des Eem-Interglazials und des folgenden glazialen Übergangs mit einem Erdsystem-Modell mittlerer Komplexität.

FÖST, Friedrich: Eine Föhn-Klimatologie für das Wipp- und Inntal.

SCHIMANKE, Semjon: Auswirkungen eines idealisierten solaren Forcings auf das Klimasystem.

SCHÖNE, Andrea: Extremwertanalyse der Niederschlagszeitreihe Berlin-Dahlem.

SCHWENDIKE, Juliane: The boundary layer winds in hurricanes Danielle (1998) und Isabel (2003).

UNGER, Sebastian: Fallstudien zur vergleichenden Anwendung der CRA-Methode mit operationell beim DWD angewendeten Nowcasting-Systemen.

WEBER, Torsten: Der Dynamische Zustandsindex (DSI) – Interpretation und Anwendung auf der synoptischen Skala.

Universität Bonn

Promotionen

AMENT, Felix: Energy and moisture exchange processes over heterogeneous land-surfaces in a weather prediction model.

MIN, Seung-Ki: Climate change assessment and climate model evaluation using multi-model ensembles: a bayesian approach.

TOST, Holger: Global Modelling of Cloud, Convection and Precipitation Influences on Trace Gases and Aerosols.

Diplom-Hauptprüfungen

HEUER, Kai-Oliver: Analyse täglicher Extremniederschläge in Deutschland mit Hilfe derExtremwertstatistik.

SCHOMBURG, Annika: An adaptive radiative transfer parametrisation for the lokal-modell.

SIMONIS, Daniel: Kalibrierung und Bewertung von Ensembles für das Modell ECHO-G mittels Bayesian Model Averaging unter Berücksichtigung verschiedener Klimaeinflussfaktoren.

URHAUSEN, Steffi: Messung der polarisierten Strahlungstemperatur mit MICCY und Interpretation anhand des LSMEM im Hinblick auf Bodenfeuchte.

Technische Universität Dresden

Diplom-Hauptprüfungen

KRÜGER, Bastian: Analyse, Interpretation und Modellierung von CO_2- und Wärmeflüssen an der Agrarstation Klingenberg.

KINDT, Henry: Wolkenlebenszyklen und Tracking von niederschlagsrelevanten Wolkenzellen anhand Meteosat-8 (MSG) Daten.

FÖRSTER, Kristian: Untersuchung der Eignung von Satellitenmessungen zur Kalibrierung der Schneemodellierung mit einem flächendifferenzierten hydrologischen Modell.

Universität Frankfurt

Promotionen

BÖNISCH, Harald: Untersuchung des Transports in der Untersten Stratosphäre anhand von in-situ Messungen langlebiger Spurengase.

Diplom-Hauptprüfungen

BÖINGHOFF, Christian: Zum expliziten Einfluss einer Unterrandbedingung in barotropen Flachwassermodellen.

BRINCKMANN, Sven: Anwendung der schrittweisen Regression auf Temperatur-Zeitreihen zur Separierung anthropogener und natürlicher Einflüsse.

Universität Freiburg

Diplom-Hauptprüfungen

EGNER, Jan-Philipp: Biegemechanische Eigenschaften von Waldbäumen.

SCHÜLER, Michael: Langzeitanalyse der Windstärke in Baden-Württemberg.

Universität Göttingen

Promotionen

GUNAWAN, Dodo: Atmospheric Variability in Sulawesi, Indonesia – Regional Climate Model Results and Observations.

Masterprüfungen

GROTE, Stefan: Struktur eines submaritimen tropischen Regenwaldes bei Bariri auf der Indonesischen Insel Sulawesi.

Bachelorprüfungen

SPERLICH, Peter: Atmosphärisches Ammoniak, Quell-, Transport- und Depositionsprozess, untersucht auf spezifische Fraktionierung mit δ15N-Isotopenmessungen.

Universität Hamburg

Habilitationen

KRÜGER, Olaf: The Influence of Ship Emissions on Climate.

Promotionen

BAEHR, Johanna: Monitoring and detecting changes in the meridional overturning circulation at 26° N in the Atlantic Ocean: the simulation of an observing array in numerical models.

KLOSTER, Silvia: DMS cycle in the ocean-atmosphere system and its response to anthropogenic perturbations.

LI, Qian: Climatological analysis of planetary wave propagation in Northern Hemisphere winter.

LORENZ, Stephan: Glacial and interglacial climate during the late Quaternary: global circulation model simulations and comparison with proxy data.

MARMER, Elina: Regional Modelling of Inorganic and Organic Aerosol Distribution and Direct Radiative Forcing over Europe.

MEYER, Elke: Die Bedeutung atmosphärischer Prozesse für den Stickstoffeintrag in Küstengewässer.

NARAYAN, Caroline: CO2 Fluxes and concentration patterns over Eurosiberia: A Study using terrestrial biosphere models and the regional atmosphere model REMO.

RÖCKMANN, Christine: Sustainable management of the eastern Baltic cod fishery.

SCHLÜTER, Ingo: Simulation des Transports biogener Emissionen in und über einem Waldbestand mit einem mikroskaligen Modellsystem.

VIZCAINO, Miren: Long-term interactions between ice sheets and climate under anthropogenic greenhouse forcing: Simulations with two complex earth system models.

Diplom-Hauptprüfungen

ALBERT, Stefanie: Wolkenklassifikationen mit AVHRR-Messungen über Brasilien.

HERBST, Ilona: Experimentelle Bestimmung des Einflusses variierender Windgrenzschichten auf die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in städtischer Bebauung.

JOOS, Hanna: Analyse indirekter Aerosoleffekte: Studie des Wochenzyklus im globalen Klima-Aerosol-Modell ECHAM5-HAM.

KRUPSKI, Michael: Erstellen einer Bulk-Parametrisierung für Verdunstung über See.

LANGMACK, Hans: Prognose meteorologischer Größen (Zugbahnen tropischer Zyklone, Wind) aus Langzeitreihen.

REINBERG, Lina: Meridionale Telekonnektionsmuster und Variabilität des Jetstream in Nord- und Südhemisphäre.

REPSCHIES, Denise: Untersuchung zur Repräsentativität lokaler Strömungsmessungen in einer idealisierten urbanen Rauhigkeitsstruktur.

REYES, FAUNES, Melanie: Trends in der vertikalen Temperaturschichtung: Untersuchung von Reanalyse- und Modelldaten.

SIECK, Kevin: Variabilität in einem niedrigdimensionalen spektralen Zweischichtenmodell der Atmosphäre mit und ohne Topographie.

Bachelorprüfungen

FOCK, Björn: Introduction to Boundary Layer Meteorology and Parametrization of Turbulent Fluxes.

KLOCKE, Daniel: Carbon monoxide total column contents from MOPITT data over Europe.

Universität Hannover

Promotionen

BÖHME, Tim: Zur Entstehung kleinräumiger, kohärenter Bodendrucksignaturen über der Norddeutschen Tiefebene.

UHLENBROCK, Jörg: Numerische Untersuchung der konvektiven Grenzschicht über realen heterogenen Landoberflächen mit einem Grobstruktursimulationsmodell.

Diplom-Hauptprüfungen

BENZE, Susanne: Development of a Calibration Method for the Photogrammetric Determination of Clouds.

DIKTY, Sebastian: A Photogrammetric Approach to the Characterization of Clouds.

MUBARAK, Riyad: Geographische Unterschiede der spektralen Bestrahlungsstärke in Hannover und am Toten Meer.
Vorbereitende Messungen und Modellrechnungen.

PISSULLA, Darius: Development of Instrumentation Measuring Sky Radiance.

WITTEMEIER, Thorsten: Messung der spektralen Globalbestrahlungsstärke im nahen Infrarot.

Universität Karlsruhe

Promotionen

HAK, Claudia: Variabilität von Formaldehyd-Konzentrationen in der verschmutzten Planetaren Grenzschicht.

HASEL, Markus: Strukturmerkmale und Modelldarstellung der Konvektion über Mittelgebirgen.

BENZ, Stefan: Experimente zur Eisnukleation von Wassertröpfchen und Sulfatpartikeln bei Temperaturen zwischen -65 °C und -30 °C.

KRAMER, Isabell: Zeitreihen troposphärischer Spurengase abgeleitet aus bodengebundenen FTIR-Messungen.

Diplom-Hauptprüfungen

BÖTTCHER, Maxi: Einfluss von Dropsondendaten aus tropischen Wirbelstürmen auf die Wettervorhersage für Europa.

HEIDT, Stephanie: Simulation konvektiver Episoden im tropischen Westafrika mit dem Lokal-Modell des

Deutschen Wetterdienstes.

LICHTENBERGER, Nicole: Modellierung von "African Easterly Waves" und deren Weiterentwicklung zu tropischen Wirbelstürmen mit dem Lokal-Modell des DWD.

SANDER, Julia: Untersuchung von Vorhersagen des Lokal-Modells (DWD) in der AMMA „Dry Run" – Periode.

VERSICK, Stefan: Vergleich verschiedenen Messmethoden für Strahlungskenngrößen des atmosphärischen Aerosols.

WOHNSIEDLER, Sabine: Erstellung und Einsatz eines Bodenkatasters für regionale Klimasimulationen.

Universität Kiel

Promotionen

MEYER, Steffen: Einfluss der Wolkenstruktur auf die reflektierte solare Strahldichte inhomogener Bewölkung.

SCHEWSKI, Mario: Photonenweglängen in konvektiver Bewölkung unter Berücksichtigung der räumlichen Wolkeninhomogenität.

Diplom-Hauptprüfungen

ERNST, Florian: Einfluss der Mikrophysik auf das Polarisationsverhalten von Cirruswolken.

KLÜSER, Lars: Strahlungsbilanz der bewölkten Atmosphäre aus MSG1-SEVIRI Daten.

LEMPIO, Guido: Machbarkeitsstudie über die Messung festen Niederschlags mit dem optischen Disdrometer.

RUDOLPH, Claudia: A model-measurements comparison of atmospheric forcing and surface fluxes of the Baltic Sea.

SCHEPANSKI, Kerstin: Natürliche Variabilität der Wolken im Klimamodell.

SPARR, Miriam: Footprints of extratropical storms in the upper ocean.

WAHL, Sebastian: Parametrisierung dreidimensionaler Strahlungsflüsse in ECHAM5.

WEGENER, Jörg: Moden nordatlantischer Klimavariabilität.

Universität zu Köln

Diplom-Hauptprüfungen

DAMRAU, Jens: Wiedergabe des westafrikanischen Monsuns in zwei Klimasimulationen von ECHAM4 und ECHAM5.

NEUHAUS, Christian P.: Einbau einer Böenparametrisierung in das mesoskalige Modell FOOT3DK.

PIECHA, Kristina: Erweiterung eines objektiven Wetterlagenklassifikationsverfahrens zur Analyse von Klimasimulationen.

REYERS, Mark: Kopplung zwischen PNA und NAO in Beobachtungen und Klimamodellen.

ZACHARIAS, Stefan: Einfluss der Nordatlantikoszillation auf die Entwicklung extremer Zyklonen.

Universität Leipzig

Promotionen

HUNGERSHÖFER, Katja: Optical Properties of Aerosol Particles and Radiative Transfer in Connection with Biomass Burning.

NOWAK, Andreas: Das feuchte Partikelgrößenspektrometer: Eine neue Messmethode zur Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen (< 1 µm) und größenaufgelösten hygroskopischen Wachstumsfaktoren bei definierten Luftfeuchten.

RADTKE, Kai: Zur Sensitivität von Starkwindfeldern gegenüber verschiedenen meteorologischen Parametern im Mesoskalenmodell LM.

TSYBULYA, Konstantin: Detection and Analysis of the Ionospheric Electron Density Structures Using GPS Radio Occultations Onboard the CHAMP Satellite.

Diplom-Hauptprüfungen

AUERSWALD, Torsten: Large-eddy simulation of the effect of soil moisture on the development of shallow cumulus convection.

BAUER, Stefan: Neubildung atmosphärischer Partikel in der kontinentalen Grenzschicht um Beijing, China.

DRESSEL, Tanja: Starkniederschläge am Erzgebirge ausgewertet mit Radardaten.

EICHLER, Heike: Hygroscopic Behaviour and Simulation of the Aerosol Extinction in South East China at Ambient Conditions.

MEIER, Jessica: Untersuchungen des hygroskopischen Partikelwachstums und dessen Auswirkungen auf die optischen Eigenschaften am Beispiel des urbanen Aerosols in Peking/China.

PETRIK, Ronny: Die Relevanz mesoskaliger Advektions- und Coriolisterme für das meso-y-Modell LMK.

SEIFERT, Patric: Seasonal Dependence of Geometrical and Optical Properties of Tropical Cirrus Determined from Lidar, Radiosonde, and Satellite Observations over the Polluted Tropical Indian Ocean (Maldives).

STOCK, Maria: Bestimmung der hygroskopischen Eigenschaften und des Mischungszustandes des ostmediterranen Aerosols in Abhängigkeit der Luftmasse während einer sommerlichen Messkampagne auf Kreta.

TESCHE, Matthias: Optische und mikrophysikalische Charakterisierung anthropogener Partikel in Südchina (Pearl-River-Delta) und Nordchina (Peking) anhand von Ramanlidar- und Sonnenphotometermessungen.

VIEHWEG, Christina: Statistische Analyse von Meteorradardaten.

VRAGEL, Marlen: Charakterisierung einer Laserstreulichtapparatur zum Nachweis von Eiskristallen unter simulierten atmosphärischen Bedingungen.

ZIESE, Markus: Untersuchung des hygroskopischen und dynamischen Wachstums organischer Aerosolpartikel am Leipzig Aerosol Claude Interaction Simulator.

Universität Mainz

Promotionen

SALZMANN, Marc: Influences of deep convective cloud systems on tropospheric trace gases and photochemistry over the tropical West Pacific: A modeling case study.

STICKLER, Alexander: HCHO, H_2O_2 und CH_3OOH in der Troposphäre.

Diplom-Hauptprüfungen

FRITSCHI, Susanne: Aufbau und Charakterisierung eines Aerosolerzeugungssystems.

KUNZ, Anne: Die Abhängigkeit der tropischen Zirkulation von der Meeresoberflächentemperatur: Aquaplanetläufe mit dem Globalmodell des Deutschen Wetterdienstes.

REUTTER, Philipp: Austausch zwischen Stratosphäre und Troposphäre in der Umgebung von Zyklonen.

ZORN, Sören: Optimierung des "Mobile Cascade Impaction System" für den Einsatz in ariden Gebieten.

Universität München (Meteorologisches Institut)

Habilitationen

SIMMEL, Friedrich, C.: Nanostrukturen und Molekulare Maschinen aus DNA.

Promotionen

JERG, Matthias: Solar radiative transfer parameterizations for threedimensional effects in cloudy atmospheres.

KREBS, Waldemar: Analyse des Einflusses des Flugverkehrs auf die natürliche Zirrusbewölkung über Europa, Nordafrika und dem Nordatlantik.

KURZ, Christian: Entwicklung und Anwendung eines gekoppelten Klima-Chemie-Modell-Systems.

STENKE, Andrea: Stratosphärischer Wasserdampf in einem gekoppelten Klima-Chemie-Modell: Simulation, Trends und Bedeutung für die Ozonchemie.

THOMSEN, Gerald: Numerical simulations of low-level convergence lines over North-Eastern Australia.

Diplom-Hauptprüfungen

ABLINGER, Markus: Daten und Ergebnisse der Messkampagne AllgEx 2005 im Allgäu und Lechtal.

GRENZHÄUSER, Jens: Untersuchung der geographischen und jahreszeitlichen Variation von troposphärischem Ozon – Vergleich von Modelldaten mit Ozonsonden- und Satellitenmessungen.

KOBER, Kirsten: Verfolgung von Gewitterzellen mittels Fernerkundungsdaten von Radar und Satellit.

KÜHNLEIN, Christian: Clear-air turbulence and gravity waves in a front/jet system.

WERNER, Angelika: Umwandlung tropischer Wirbelstürme in den mittleren Breiten: Historische Analyse und Analyse existierender Windfelddaten zur Weiterentwicklung eines angewandten Windfeldmodells.

YEN, Wenchieh: Untersuchung der Wolken- und Niederschlagsvorhersagen mit dem Lokal-Modell: Die BBC Fallstudien.

Technische Universität München

Diplom-Hauptprüfungen

MERK, Conny: Beginn und Ende der Vegetationsperiode aus NOAA/AVHRR-NDVI-Daten und phänologischen Beobachtungen - ein Vergleich.

Masterprüfungen

KOSTOVA, Mariay: Regionale Muster in der Temperaturreaktion von phänologischen Phasen in Europa.

BAUMANN, Sabine: Aufbau eines Gletscherinventars für Kolumbien und Abschätzung glaziologischer Parameter.

Universität Potsdam

Promotionen

STACHLEWSKA, Iwona: Investigation of tropospheric arctic aerosol and mixed-phase clouds using airborne lidar technique.

FRIELER, Katja: Beitrag zum theoretischen Verständnis polarer stratosphärischer Ozonverluste.

Universität Graz

Promotionen

GONZI, Siegfried: Clear Sky Aerosol Radiative Forcing Effect based on multisite AERONET Retrievals over Europe.

REHRL, Christoph: Retrieval Processing System and Performance Analysis for Mesospheric Temperature and Ozone Profiling Based on Solar Occultation Data.

Diplom-Hauptprüfung

MOSER, Michael: Bauernregeln wissenschaftlich betrachtet: Untersuchung empirischer Witterungs- und Klimaregeln in den Regionen Oststeiermark und Graz.

Universität Innsbruck

Promotionen

WEISSMANN, Martin: Meteorological Applications of Airborne Doppler Lidar Measurements.

Diplom-Hauptprüfungen

ABERMANN, Jakob: Glaziologische Analyse der Höhe der Gletscheroberfläche am Kesselwandferner.

BORTENSCHLAGER, Thomas: Bestimmung der Winterbilanz des Hintereisferners.

FUCHS, Daniel: Temperature Analyses of Days with Precipitation in Alpine Regions.

HAAS, Georg: Nordföhn und Niederschlag in Innsbruck.

HÖLZLI, Martin: Weiterentwicklung des Abflussmodells ITGG2.0-R durch hochaufgelöste Strahlungsmodellierung: Anwendung in einem tropischen, vergletscherten Einzugsgebiet (Cordillera Blanca, Peru).

MARQUARDT, Klaus: Zweidimensionale Potentialströmung und beobachtete Windfelder im Raum Innsbruck.

MÜLLAUER, Eva Maria: On the predictability of low visibility conditions at Vienna Airport.

PETERLIN, Dietmar: Sonnenscheindauer und Globalstrahlung in Innsbruck.

SCHICKER, Irene: Changes in Area of Stubai Glaciers analysed by means of Satellite Data for the GLIMS Project.

SCHROTT, Daniel: Flächenhafte Modellierung der Energie- und Massenbilanz am Hintereisferner: das Haushaltsjahr 2003/04.

STÜTZ, Andreas: Die Entwicklung der Innsbrucker Temperaturreihe seit 1777.

VERANT, Werner: Föhnklimatologie für Südtirol und das Aostatal, Objektive Föhnklassifikation.

Universität Wien

Promotionen

STOTTER, Christian: The airborne magnetic method in highly magnetized environment: Quantitative analysis of data from the Aeolian Islands region.

Diplom-Hauptprüfungen

BIERMAIR, Nicola Maria: Objektive Strömungslagenklassifikation mit VERA.

BRAZDA, Katharina: Gravimetrische Feldfortsetzung und ihre Regularisierung.

DORAU, Fanny: Blitzaktivität im Vergleich mit Wetterradar-Beobachtungen.

FILIPOVIC, Niko: Statistisches Downscaling in Mitteleuropa.

ITA, Anna: Bearbeitung historischer und aktueller Magnetfelddaten in Österreich, deren Darstellung und Veränderung.

KAUFMANN, Hildegard: Die Mesoskalige Analyse der Feuchteflussdivergenz im Alpenraum.

PISTOTNIK, Georg: Evapotranspiration und konvektiver Niederschlag im Ausschnittsmodell „Aladin-Austria".

STRAUSS, Franziska: Unsicherheiten in der Bewölkungsevaluierung mit ISCCP-Daten

TAVOLATO, Christine: Vergleich globaler korrigierter Radiosondentemperaturdatensätze untereinander sowie mit MSU – Satellitendaten.

Universität Basel

Promotionen

MÜLLER, Mathias: Numerical simulation of fog and radiation in complex terrain – Results from Cost-722/1-DEFOP.

RIGO, Gergely: Satellite Analysis of Radiation and Heat Fluxes during the Basel Urban Boundary Layer Experiment (BUBBLE).

Masterprüfungen

LEHMANN, Markus: Klimatische Ausgleichsfunktionen von Grünräumen der Stadt Basel – Möglichkeiten und Grenzen von Modellierung.

Diplom-Hauptprüfungen

EITEL, Jan: CO_2-Flüsse und –Konzentrationen über einer urbanen Fläche im Jahres-Zyklus.

Universität Zürich

Promotionen

BOURGEOIS, Claude Saskia: The radiative properties of snow at Summit, Greenland.

CORTI, Thierry: The Impact of Cirrus Clouds on Radiation and Vertical Transport in the Tropics.

DIDONE, Marco: Performance and error diagnosis of global and regional NWP models.

HESS, Maurus: Utilizing Backscattering Spectrometry for studying Physical and Chemical Processes on Salt Crystals.

HIRSCHI, Martin: Seasonal Variations in Terrestrial Water Storage: Diagnosis and Climate Model Analyses.

HOHENEGGER, Cathy: Dynamical analysis of atmospheric predictability in cloud-resolving Models.

LEGREID, Geir: Oxigenated Volatile Organic Compounds (OVOcs) in Switzerland: From the boundary-layer to the unpolluted troposphere.

ORDONEZ, Carlos: Trend Analysis of Ozone and Evaluation of Nitrogen Dioxide Sattelite Data in the Troposphere over Europe.

SAWYER, Barton William: Efficient numerical methods for the shallow water equations on the Sphere.

SCHAUB, Daniel: Tropospheric nitrogen dioxide from GOME and SCIAMACHI measurements over the Alpine region: Strengths and Limitations.

SCHELANDER, Peter: Turbulence characteristics of the atmospheric boundary layer over the dry zone of the Greenland ice sheet.

SODEMANN, Harald: Tropospheric transport of water vapour: Lagrangian and Eulerian Perspectives.

SUTTER, Marcel: Surface radiation and climate at high latitudes, homogenization and analyses of data from Arctic and Antarctic BSRN sites.

VAN EKEREN, Johannes Stefanus: Characterization of an expansion-type cloud condensation nuclei chamber.

ZARDINI, Alessandro Alessio: The effects of organic compounds on the hygroscopic properties of inorganic aerosols.

Nachtrag: Universität zu Köln

2000

Diplom-Hauptprüfungen

FISCHER, Bernd: Implementierung eines langwelligen Strahlungsschemas in ein mesoskaliges Strömungsmodell.

QUAAS, Johannes: Kopplung eines Atmosphärenmodells und eines Ozeanmodells auf einem Meta-Computer.

SENTUC, Florence-Nathalie: Entwicklung und Anwendung eines Programmsystems zur Trajektorienberechnung in der planetaren Grenzschicht.

Promotionen

SCHELL, Benedikt: Die Behandlung sekundärer organischer Aerosole in einem komplexen Chemie-Transport-Modell.

TOKANO, Tetsuya: Simulation of Titan´s Atmosphere by a General Circulation Model.

2001

Promotion

TEUCHERT, Dorle: Ein bodennahes Strömungsmodell für den Waldbestand. Entwicklung und Anpassung eines diagnostischen Strömungsmodells für den operationellen Betrieb.

2002

Promotion

RADDATZ, Thomas: Hoch- und ultrahochfrequente Variabilität im nordhemisphärischen Winter.

2003

Promotion

REINER, Andreas: Synoptische Wellenstörungen und mesoskalige Konvektionsniederschläge in der westlichen Sahel- und Sudanzone, Analyse mittels satellitengestützter Mikrowellen-Niederschlagsschätzung.

2005

Promotion

TOENGES SCHULLER, Nicola: Globale Verteilungsmuster anthropogener Stickoxidemissionen: Vergleich und Integration von troposphärischen Satellitenbeobachtungen und Modellrechnungen".

Examina früherer Jahre sind in folgenden Heften veröffentlicht:

Heft	*Prüfungsjahrgang*	
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	
1/2 30	2002	
4 30	2003	
2-4 31	2004	
1/2 32	2005	

Bezugsbedingungen von promet

Herausgeber der Fortbildungszeitschrift promet ist der Deutsche Wetterdienst (DWD) mit Sitz in Offenbach am Main. Demzufolge erhalten die Mitarbeiter des DWD sowie des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (GeoInfoDBw) promet auf dem Dienstweg. Ferner gibt der DWD promet kostenlos ab an die fest angestellten 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 vom promet an die genannten Empfängerkreise erfolgt zentral durch die Bibliothek des DWD. Wenden Sie sich daher bei Nichterhalt von promet bitte direkt dorthin:

DWD/Deutsche Meteorologische Bibliothek, Kaiserleistraße 29/35, 63067 Offenbach am Main.

Personen sowie Institutionen, die nicht zu dem oben genannten Empfängerkreis gehören, können promet wie folgt erhalten:
- durch den Kauf eines Einzelheftes
- durch den 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/gesellschaft/publikationen/promet.htm entnommen werden.

Redaktionelle Hinweise für Autoren

1 Allgemeines

promet dient der Fortbildung der Mitarbeiter des DWD sowie des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr (GeoInfoDBw). 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

Nummerierung 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) oder Dateien in einem der folgenden Formate: *.jpg, *.tif, *.ps bzw. *.eps in möglichst hoher Auflösung/Qualität. Legenden zu den Abbildungen auf besonderem Blatt beifügen.

2.4 Formeln, Gleichungen

Auf das Notwendige beschränken, deutlich lesbar mit fortlaufender Nummerierung 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*: ... MULLER (1980) ... oder ... (MULLER 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:*
  SCHONWIESE, 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 Belegexemplare, Fortdrucke

Autoren der Hauptbeiträge erhalten je fünf Belegexemplare, Autoren der Kurzbeiträge je ein Belegexemplar des betreffenden Heftes. Zusätzliche Exemplare können gegen Erstattung der Fortdruckkosten bei der Rücksendung der Korrekturen bestellt werden.

Detaillierte Autorenhinweise erhalten Sie bei der Schriftleitung.

Manuskriptsendungen werden erbeten:
Deutscher Wetterdienst
Hauptschriftleitung Promet
Postfach 10 04 65
63004 Offenbach/Main
Telefon 069 8062-2591
Telefax 069 8062-2592
joerg.rapp@dwd.de

Anschriften der Autoren dieses Heftes

DR. PAUL BECKER
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Medizin-Meteorologie
Stefan-Meier-Straße 4-6
79104 Freiburg i.Br.
E-Mail: paul.becker@dwd.de

PROF. DR. HEIDRUN BEHRENDT
ZAUM-Zentrum Allergie und Umwelt
Technische Universität München
Biedersteiner Straße 29
80802 München
E-Mail: Heidrun.Behrendt@lrz.tum.de

PROF. DR. KARL-CHRISTIAN BERGMANN
Charite´- Universitätsmedizin Berlin
Allergie-Centrum-Charite´
Klinik für Dermatologie und Allergologie
Luisenstraße 2-5
10117 Berlin
E-Mail: kcbergmann@hotmail.com

DR. KLAUS BUCHER
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Medizin-Meteorologie
Stefan-Meier-Straße 4-6
79104 Freiburg i.Br.
E-Mail: klaus.bucher@dwd.de

PROF. DR.-ING. HANS BURKHARDT
Lehrstuhl für Mustererkennung und Bildverarbeitung
Institut für Informatik
Universität Freiburg
Georges-Koehler-Allee 52
79110 Freiburg
E-Mail: Hans.Burkhardt@informatik.uni-freiburg.de

DR. DUSAN FIALA
FBTA
Universität Karlsruhe
Englerstraße 7
76131 Karlsruhe
E-Mail: dfiala@fbta.uni-karlsruhe.de

DIPL.-MET. ANGELIKA GRÄTZ
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Medizin-Meteorologie
Stefan-Meier-Straße 4-6
79104 Freiburg i.Br.
E-Mail: angelika.graetz@dwd.de

PROF. DR. GEORGE HAVENITH
Dept. Human Sciences
Environmental Ergonomics Research Centre
Loughborough University
Loughborough
LE11 3TU, UK
E-Mail: G.Havenith@lboro.ac.uk

PROF. DR. OLF HERBARTH
Universität Leipzig
Medizinische Fakultät
Umwelthygiene und Epidemiologie (Umweltmedizin)
Liebigstraße 27
04103 Leipzig

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Dept. Expositionsforschung und Epidemiologie
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
E-Mail: Olf.Herbarth@ufz.de

PROF. DR. GERD JENDRITZKY
Meteorologisches Institut
Universität Freiburg
Werderring 10
79085 Freiburg i. Br.
E-Mail: gerd.jendritzky@meteo.uni-freiburg.de

DIPL.-MET. UWE KAMINSKI
Deutscher Wetterdienst
Abt. Medizin-Meteorologie
Stefan-Meier Straße 4-6
79104 Freiburg
E-mail: Uwe.Kaminski@dwd.de

DR. PETER KÖPKE
Ludwig-Maximilians-Universität München
Meteorologisches Institut
Theresienstraße 37
80333 München
E-Mail: peter.koepke@lrz.uni-muenchen.de

DR. CHRISTINA KOPPE
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Medizin-Meteorologie
Stefan-Meier-Straße 4-6
79104 Freiburg i.Br.
E-Mail: christina.koppe@dwd.de

DR. GUDRUN LASCHEWSKI
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Medizin-Meteorologie
Stefan-Meier-Straße 4-6
79104 Freiburg i.Br.
E-Mail: gudrun.laschewski@dwd.de

DR. MARIANNE PLACZEK
Klinik und Poliklinik für Dermatologie und Allergologie
Klinikum der Universität
Ludwig-Maximilians-Universität München
Frauenlobstraße 9–11
80337 München
E-Mail: marianne.placzek@lrz.uni-muenchen.de

PROF. DR. JOHANNES RING
Klinik und Poliklinik für Dermatologie und Allergologie am Biederstein
Klinikum rechts der Isar
Technische Universität München
Biedersteiner Straße 29
80802 München
E-Mail: Johannes.Ring@lrz.tum.de

PRIV-DOZ. DR. HABIL. UWE SCHLINK
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Dept. Expositionsforschung und Epidemiologie
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
E-Mail: Uwe.Schlink@ufz.de

DR. ECKART SCHULTZ
Deutscher Wetterdienst
Abt. Medizin-Meteorologie
Stefan-Meier Straße 4-6
79104 Freiburg
E-Mail: Eckardt.Schultz@dwd.de

DIPL.-MET. HENNING STAIGER
Alte Yacher Straße 43
79215 Elzach
E-Mail: Henning.Staiger@gmx.de

DR. BIRGER TINZ
Deutscher Wetterdienst
Regional- und Seewetterzentrale Hamburg
Bernhard-Nocht-Straße 76
20359 Hamburg
E-Mail: birger.tinz@dwd.de

DR. HEIKE VOGEL
DR. BERNHARD VOGEL
Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Forschungszentrum Karlsruhe/Universität Karlsruhe
Postfach 3640
76021 Karlsruhe
E-Mail: bernhard.vogel@imk.fzk.de

DIPL.-MET. EVA R. WANKA
Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin
Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München
Ziemssenstraße 1
80336 München
E-Mail: Eva.Wanka@med.uni-muenchen.de

DR. PETER WINKLER
Hechenbergstraße 9
82362 Weilheim
E-Mail: pu_winkler@t-online.de

promet

Vorschau auf die nächsten Hefte

- Meteorologie und Versicherungswirtschaft
  (Fachredaktion: Prof. Dr. P. Höppe)
- Die Nordatlantik-Oszillation
  (Fachredaktion: Prof. Dr. U. Ulbrich)
- Interaktive Lernprogramme in der Meteorologie
  (Fachredaktion: Dr. W. Jacobs, Dr. V. Zwatz-Meise)