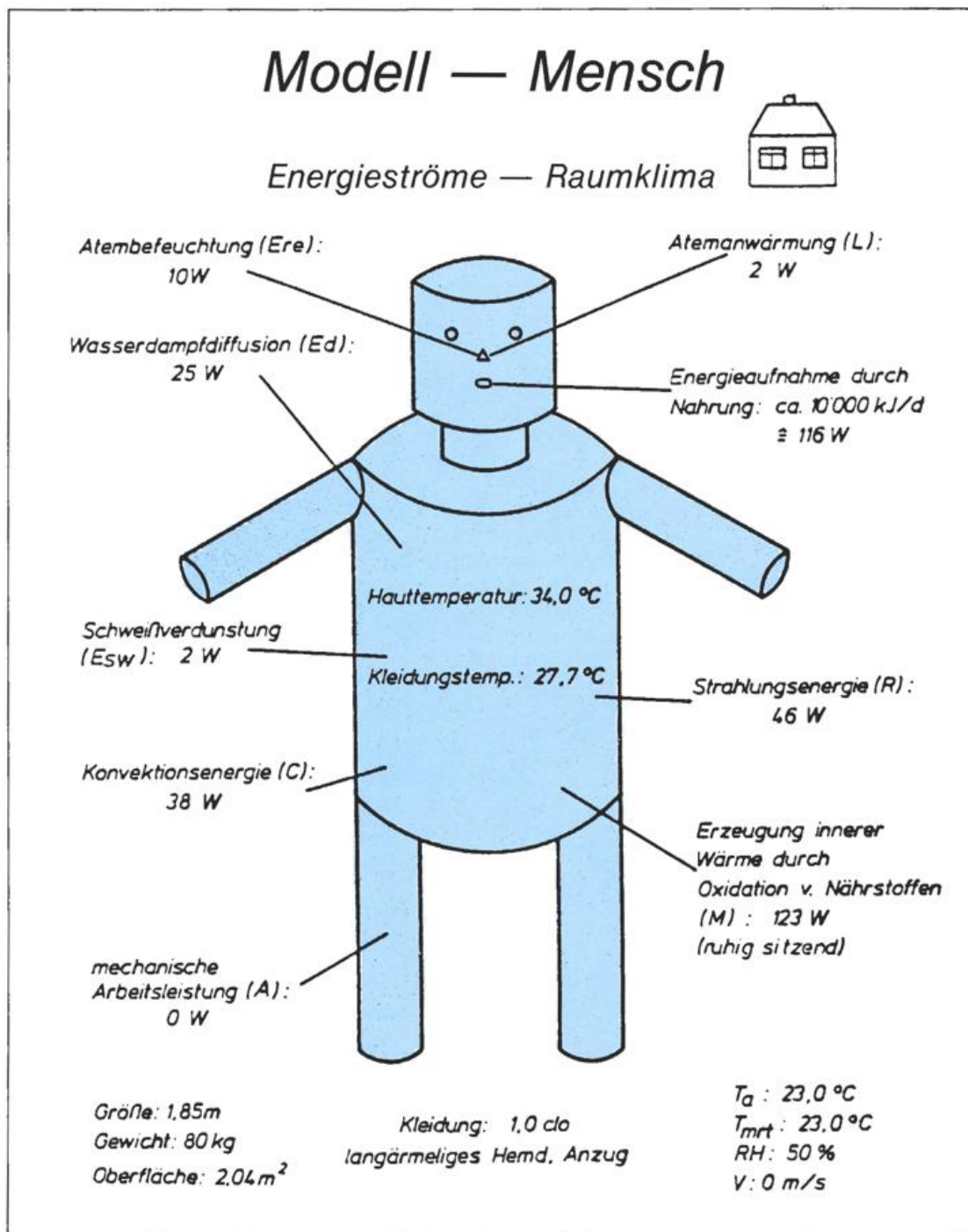


Biometeorologie



Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

HauptschriftleiterM. Schlegel
Frankfurter Straße 135
6050 Offenbach am Main**Redaktionsausschuß**A. Baumgartner (München)
H. Fiedler (Karlsruhe)
H.-W. Georgii (Frankfurt)
H. Hinzpeter (Hamburg)
E. Lingelbach (Offenbach)
H. Reiser (Offenbach)
R. Simonis (Offenbach)
S. Uhlig (Traben-Trarbach)
F. Wippermann (Darmstadt)**Zum Titelbild**

Dargestellt sind am Beispiel des menschlichen Körpers die energetischen Verhältnisse für eine vorgegebene Situation im Raumklima.

promet erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes — Zentralamt — Frankfurter Straße 135, 6050 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang (4 Hefte) DM 32,—, Einzelheft DM 8,50.

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

Druck: Schön & Wetzel GmbH, Offenbacher Landstraße 368, 6000 Frankfurt (Main).

ISSN 0340-4552

Meteorologische Fortbildung

12. Jahrgang, Heft 3/4 1982

Thema des Heftes:

Biometeorologie

(Fachliche Redaktion: A. Baumgartner, München)

Beiträge

	Seite
Vorbemerkungen	1
A. BAUMGARTNER	
1 Biometeorologie, Forschungsgebiete und Anwendungsbereiche	1
P. HÖPPE	
2 Physikalische Prinzipien in der Biometeorologie	4
J. v. HOYNINGEN-HUENE und H. BRADEN	
3 Zur Wirkung mikro-meteorologischer und biophysikalischer Vorgänge auf die pflanzliche Produktion	10
H. FRIESLAND	
4 Die Rolle der Biometeorologie im integrierten Pflanzenschutz	16
H. MAYER	
5 Forstmeteorologie	22
K. HÖSCHELE	
6 Die Wirkung meteorologischer Bedingungen auf den Menschen	29
G. JENDRITZKY	
7 Zum thermischen Wirkungskomplex des Menschen	33
R. REITER	
8 Zur Möglichkeit biologischer Wirkungen elektrischer und elektromagnetischer Felder, Ionen und Aerosolen	43
F. J. LÖPMEIER	
9 Grundzüge der Biometeorologie landwirtschaftlicher Nutztiere	51
K. HÖSCHELE	
10 Biometeorologische Umweltforschung	56

Institute stellen sich vor

Abteilung Klimatologie des Chemischen Untersuchungsamtes der Landeshauptstadt Stuttgart (J. BAUMÜLLER; U. HOFFMANN; U. REUTER)

59

Blick zurück

30 Jahre Deutscher Wetterdienst

61

Neuerscheinungen

61

Habilitationen, Promotionen und Diplom-Hauptprüfungen an den Universitäten der Bundesrepublik Deutschland und West-Berlins im Jahre 1981

62

Thema dieses Heftes:

Biometeorologie

Vorbemerkungen

Das vorliegende „PROMET“ gilt der „Biometeorologie“. Es soll einen Überblick über die Probleme, die Arbeitsmethoden, die Entwicklungsrichtungen und über die Anwendungsbereiche vermitteln.

In der Einführung definiert BAUMGARTNER die Biometeorologie als Teil der Angewandten Meteorologie und umreißt deren Forschungsgebiete.

Durch HÖPPE, der physikalische Prinzipien der Biometeorologie erläutert, erfolgt eine Zuordnung zur Biophysik. Die folgenden Beiträge sind auf die Sachgruppen Pflanzen-, Human- und Tier-Biometeorologie ausgerichtet.

VON HOYNINGEN-HUENE befaßt sich mit der meteorologischen Steuerung des Pflanzenwachstums unter mikrometeorologischen und physiologischen Aspekten. FRIESLAND erörtert die Rolle der Biometeorologie im integrierten Pflanzenschutz im Zusammenhang mit der Nutzung von Ertragsvorhersagemodellen der Landwirtschaft. Zu den meteorologischen Problemen der Forstwirtschaft und den Zielen der Forstmeteorologie gibt MAYER Auskunft.

Den Abschnitt Human-Biometeorologie eröffnet der Beitrag von HÖSCHELE über die Wirkungsweise meteorologischer Einflüsse auf den Menschen. Eine Vertiefung und Erweiterung dieses Themenkreises im thermischen Bereich wird im Aufsatz von JENDRITZKY gegeben. REITER widmet sich dem elektrischen und elektromagnetischen Wirkungskomplex und zieht einen Trennungsstrich zwischen wissenschaftlich vertretbaren Aussagen und unfundierten Vermutungen.

Für den Bereich Tier-Biometeorologie hat LÖPMEIER einige Probleme über meteorologische Einflüsse auf Nutztiere mitgeteilt. Den Abschluß des Heftes bildet der Beitrag von HÖSCHELE, der aufzeigt, daß die Biometeorologie auch für die Umweltforschung von großer Bedeutung ist.

A. BAUMGARTNER, München

1 Biometeorologie, Forschungsgebiete und Anwendungsbereiche

Die Biometeorologie befaßt sich mit der Abhängigkeit der belebten Natur von der atmosphärischen Umwelt. Sie hat zwei Komponenten:

- a) Die Forschung sucht nach den Wirkungen von Zustand und Vorgängen der Atmosphäre auf die Biosphäre (Bios = das Leben). Sie ist ein Grenzgebiet von Meteorologie und Biologie, aber primär Teilgebiet der Meteorologie.
- b) In der dienenden Nutzbarmachung des Wissens über die Zusammenhänge von Meteorologie und Lebensvorgängen ist sie Angewandte Meteorologie. Sie erhöht damit den Wirkungsgrad der praktischen Meteorologie.

1 Definitionen

Die „Internationale Biometeorologische Gesellschaft“ (ISB) entwarf 1970 folgende Definition (vgl. hierzu TROMP 1970):

„Biometeorologie ist die Wissenschaft von den direkten und indirekten Einflüssen, und zwar ungleichmäßiger, fluktuierender oder periodischer Art, der physikalischen, chemischen und physiochemischen Mikro- und Makroumgebung, nämlich der Erdatmosphäre und ähnlicher extraterrestrischer Faktoren, auf physiko-chemische Systeme im allgemeinen und auf lebende Organismen, wie Pflanzen, Tiere und Menschen, im einzelnen.“ Die Gesellschaft dehnte somit das Spektrum der Arbeitsbereiche auch auf extraterrestrische oder kosmische Einflüsse aus. Dazu sind beispielsweise elektromagnetische Felder zu zählen.

Nahezu synonym mit „Biometeorologie“ ist die Bezeichnung „Bioklimatologie“. Vielfach wird die Bioklimatologie inhaltlich mit der Biometeorologie gleichgesetzt, analog dem Gebrauch von Mikrometeorologie und Mikroklimatologie oder dem gegenwärtig sich vollziehenden Zusammenrücken von Meteorologie und Klimatologie. Differenzierendes Kriterium ist die Zeitskala in der Betrachtungsweise. Auf Vorschlag der ISB und der WMO ist im englischen Sprachgebrauch, in dem die Sequenz Wetter, Witterung, Klima fehlt, das Wort „Bioclimatology“ generell durch „Biometeorology“ ersetzt. In deutschsprachigen und romanischen Ländern hingegen ist der Ausdruck Bioklimatologie bis heute sehr gebräuchlich und häufig als Gegenstück zur „Biosynoptik“, deren Zeitskala sich im Stunden- oder Tagebereich bewegt, verwendet. Ein Unterschied ist auch denkbar durch die Auffassung, daß sich die Biometeorologie mehr mit den Prozessen oder Wirkungsweisen und die Bioklimatologie im statistischen Sinne mit den Zusammenhängen und Phänomenen befaßt. So wäre z. B. die Wirkung eines Frontdurchganges der Biometeorologie oder der Biosynoptik zuzuschreiben und die Untersuchung witterungsbedingter oder saisonaler Einflüsse auf einen Organismus zur Bioklimatologie zu zählen.

2 Teilgebiete der Biometeorologie

Die Abgrenzung von Teilgebieten der Biometeorologie ist relativ einfach; sie kann sich auf die Art des zu untersuchenden Lebewesens oder auf den Ort der Untersuchung beziehen. Da-

nach sind die „Human-Biometeorologie“, die „Phyto-Biometeorologie“ und die „Tier-Biometeorologie“ bezeichnet, je nachdem der Mensch, die Pflanze oder das Tier Forschungsobjekt ist. In der regionalen Betrachtungsweise können die Klimate der Erde Attribute sein, z.B. Alpine, Maritime, Tropische-Bioklimatologie etc. Eine schematische Übersicht wird in Tabelle 1 vermittelt.

Tab. 1: Gliederung, Anwendungsbereiche der Biometeorologie

Biometeorologie (Bioklimatologie, Biosynoptik)		
Mensch	Pflanze	Tier
Physiologische —	Physiologische —	Physiologische —
Pathologische —	Pathologische —	Pathologische —
Medizin- meteorologie	Agrar- meteorologie	Agrar- meteorologie
Raum/Stadt —	Forstmeteorologie	Phänologie
Soziologische —	Phänologie	

2.1 Mensch

Nach TROMP (1980) kann man in der Human-Biometeorologie folgende Forschungs- und Anwendungsgebiete unterscheiden:

- a) Physiologische Biometeorologie
Sie beschreibt den Einfluß der atmosphärischen Vorgänge mit ihrem physikalischen und chemischen Wirkungskomplex auf die physischen Reaktionen von gesunden Menschen. Solche sind unter den Stichworten Wetterfähigkeit oder Meteorotropismus, Behaglichkeit oder Unbehaglichkeit, Wetter und Leistung etc. geläufig.
- b) Pathologische Biometeorologie
Sie befaßt sich sowohl mit gesunden als auch mit kranken Menschen, indem sie den Einfluß von Wetter, Witterung und Klima als Erkrankungsursache aber auch als Heilmittel für Erkrankte betrachtet. Der Begriff Pathologische Biometeorologie ist annähernd mit „Medizin-Meteorologie“ gleichzusetzen. Da die Medizin nicht nur eine Wissenschaft vom kranken Menschen, sondern auch vom gesunden Menschen ist, gibt es zwischen den Begriffen der Physiologischen und Pathologischen Biometeorologie viele Überschneidungen. Sie berühren sich z. B. in der Kurortklimatologie, in der Klima-Therapie oder manifestieren sich bei der medizin-meteorologischen Prognose biotroper Vorgänge sowie bei der Ausscheidung von zeitlichen Reiz- und Schonzuständen in Abhängigkeit von der Wetterphase bzw. von Reiz- und Schonklimaten in regionaler Betrachtungsweise. So wie die meteorologisch gesteuerte Erregungsperiode von einer Zeitskala von Sekunden bis zu Jahren umfaßt, so reicht auch die Zeitskala der Reaktionsphasen des Menschen von Sekunden, z.B. beim Niesen nach Luftzug, bis zu Monaten und Jahren in der Epidemiologie.
- c) Raum- und Stadt-Biometeorologie
Der Einfluß von Mikroklimaten in Wohn- und Arbeitsräumen sowie in Wohngebieten, wie den Städten, auf das Wohlbefinden und die Gesundheit von Menschen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Nicht nur die Erfassung der Raum- und urbanen Klimate im gegenwärtigen Zustand,

sondern auch die Auswirkungen von Veränderungen der Raum- und Stadtstrukturen in aktinischer, thermischer, hygrischer, dynamischer und luftchemischer Hinsicht sowie die bioklimatische Quantifizierung der Wirkungen auf die Bewohner fallen in diesen Arbeitsbereich.

d) Soziologische Bioklimatologie

Durch sie werden die Auswirkungen von meteorologisch/klimatologischen Einflüssen auf Gesundheit, Verhaltensweisen und kulturelle Aktivitäten von Bevölkerungsgruppen, z. B. auf Freizeitgestaltung und Erholung untersucht.

2.2 Pflanzen

Die Pflanzen- oder Phyto-Biometeorologie ist analog zur Human-Biometeorologie in die Physiologische und Pathologische Pflanzenbiometeorologie zu gliedern, wobei in dem einen Falle die grundsätzlichen Wirkungsmechanismen von atmosphärischen Einflüssen auf das Pflanzenwachstum und in dem anderen Falle die Wetterschäden bei Pflanzen Forschungsobjekte sind. Letztere umfassen ein weites Feld von Hitze-, Dürre-, Wasser- bis Frostschäden, von Wind- und Strahlungsschäden oder von luftchemischen Einwirkungen. Verbindende Aufgaben erfüllen die phänologischen Beobachtungen, die Phänologie und die Phänometrie. In der Anwendung der Pflanzen-Biometeorologie sind zwei Hauptforschungsgebiete nach den Nutzpflanzen oder der Landnutzung als „Agrarmeteorologie“ und als „Forstmeteorologie“ benannt.

Die „Agrarmeteorologie“ erbringt Dienstleistungen für die Landwirtschaft durch regionale Differenzierung der Anbaustandorte, durch klimatische Bonitierung z. B. im Weinbau, durch die Überwachung der Wachstumsbedingungen z. B. von Bodenfeuchte oder Beregnungsbedarf, durch Feststellung der ertragsfördernden Mikroklimata, durch Messung der Bestandsklimata oder durch Verfolgung der Witterungsabläufe im Zusammenhang mit Pflanzenkrankheiten oder mit der Verbreitung von Pflanzenschädlingen. Hohen wirtschaftlichen Wert besitzen die spezifischen Wetterprognosen zur Regelung von Feldarbeit, zur rationellen Anwendung von Düngemitteln, zur zeitlichen Festlegung der Schädlingsbekämpfung oder zur Verminderung von Wetterschäden. Die Mithilfe zur Sicherung und Steigerung von Pflanzenertrag und -qualität erfordert vom Agrarmeteorologen ein breites Wissen um die Zusammenhänge der Wirkungskompartimente Atmosphäre/Pflanze/Boden/Standort, Landarbeit und Landtechnik und gleichzeitig die Fähigkeit zur Anwendung moderner Meßtechnik sowie analytischer Verfahren zur Entwicklung von Rechenmodellen.

In der „Forstmeteorologie“ beträgt die Zeitskala des Wachstumsvorganges von Baum und Waldbestand mehrere Menschengenerationen. Daher sind die klimatischen Standortsbeurteilungen von besonderem Interesse. Die Entwicklung der Bestände wird durch Waldarbeit beeinflusst; so wird z. B. mit der Entscheidung der Pflanzweite, dem Durchforstungsgrad (Auslichten), das Bestandsklima geändert. Davon hängt die natürliche Regeneration, der Zuwachs von Biomasse und die Baumqualität ab. Mit der Erforschung von Strahlungs-, Wärme-, Wasserhaushalt oder der Stoffumsätze von Wasserdampf, Kohlendioxid etc. werden die Grundlagen zu den Zuwachsmodellen geschaffen. Die Erforschung der Ursachen

der Wetterschäden im Walde und der Vermeidungsstrategien von Wetterschäden, wie Schnee- und Eisbruch, Frostschäden, Hitze- und Dürreschäden, Sturmschäden oder Waldbrände und die Ursachenfindung des gegenwärtigen Baumsterbens gehören zu den Aufgaben dieses Zweiges der Angewandten Meteorologie. Die klimatischen, hygrischen, hygienischen und hydrologischen Waldfunktionen, im Nah- und Fernbereich, z.B. die Bioklimatologie der Waldraumatmosphäre, zählen ebenfalls zum Forschungsbereich.

2.3 Tiere

Die Tier-Biometeorologie, man könnte diese abgekürzt von Zoologie als Zoo-Biometeorologie benennen, muß sich ebenfalls mit der Wissensmehrung und -vermittlung der Einflüsse atmosphärischer Zustände und Vorgänge auf die Physiologie der Tiere, insbesondere der Nutztiere, im Freien oder in Ställen, befassen. Die Produktivität und Gesundheit der Nutztiere ist mit dem Wetterablauf und dem Raumklima und dem Standortklima gekoppelt. Die Erforschung von Ursachen klimatischer Selektionsvorteile bei der geographischen Verteilung der Lebensräume von Tierpopulationen steht im Zusammenhang mit Züchtung und räumlichem Austausch von Nutztieren.

2.4 Weitere Anwendungsbereiche

Neben den genannten 3 Zielgruppen der Biometeorologie sind Randgruppen, wie die Kosmische Biometeorologie, die Weltraumbiometeorologie oder die Paleobiometeorologie zu nennen. Die Kosmische Biometeorologie befaßt sich mit dem Einfluß von extraterrestrischen Faktoren, wie z. B. der Sonnenaktivität oder der kosmischen Strahlung, auf Organismen. In der Weltraum-Biometeorologie ist das Studium des den Raumfahrer in Kapsel und Weltall umgebenden Bioklimas von Interesse.

Die Paleobiometeorologie erforscht die Wirkungen der Klimate der Vergangenheit und deren Bedeutung für die Evolution und geographische Verteilung von Mensch, Tier und Pflanze. Ein bekanntes Anwendungsgebiet ist die Dendroklimatologie, die von der Jahrringbreite der Baumstämme auf die klimatischen Bedingungen während der Wachstumsperiode schließt. Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß die Biometeorologie einen beachtlichen Teil der Biosphäre- und Umweltforschung auf sich genommen hat.

3 Biometeorologische Forschung in Deutschland

Im folgenden sind die Institute und Dienststellen, die biometeorologische Forschung in Deutschland durchführen, getrennt nach den Bereichen Human-, Pflanzen- und Tier-Biometeorologie aufgeführt. Da die Biometeorologie ein interdisziplinäres Forschungsgebiet ist, befinden sich in der sicher nicht vollständigen Liste der Forschungsstellen naturgemäß auch medizinische, zoologische, botanische, biologische und geographische Institute.

a) Forschungsstellen für Human-Biometeorologie

Zentrale Medizinmeteorologische Forschungsstelle des DWD, Freiburg

Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung, Garmisch-Partenkirchen
 Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen-Stuttgart
 Geographisches Institut, Freiburg
 Institut für Angewandte Physik, Abt. f. Oekologische Physik, Hannover
 Institut für Balneologie und Klimaphysiologie, Freiburg
 Institut für Bauphysik, Essen
 Institut für Medizinische Balneologie und Klimatologie, München
 Institut für Meteorologie, Berlin
 Institut für Meteorologie und Klimatologie, Hannover
 Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie, München
 Lehrstuhl für Ökologie, Osnabrück
 II. Med. Universitätsklinik, Hamburg-Eppendorf
 Meteorologisches Institut, Karlsruhe

b) Forschungsstellen für Pflanzen-Biometeorologie

Zentrale Agrarmeteorologische Forschungsstelle des DWD, Braunschweig
 Agrarmeteorologische Beratungs- und Forschungsstellen des DWD, Ahrensburg, Geisenheim, Weihenstephan
 Institut für Botanik, Hohenheim
 Institut für Landeskultur und Pflanzenökologie, Hohenheim
 Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Braunschweig
 Institut für Pflanzenökologie, Gießen
 Lehrstuhl für Bioklimatologie, Göttingen
 Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie, München
 Lehrstuhl für Oekologie, Osnabrück
 Meteorologisches Institut, Freiburg

c) Forschungsstellen für Tier-Biometeorologie

Zentrale Agrarmeteorologische Forschungsstelle des DWD, Braunschweig
 Institut für Nutztierökologie, Gießen
 Institut für Physik, Hohenheim
 Institut für Tierhygiene, Hannover
 Zoologisches Institut, Frankfurt
 Zoologisches Institut, Göttingen

4 Ausbildung, Erfahrung

Es gibt keine direkte Ausbildung als Biometeorologe. Für Meteorologen, die jedoch dieses Arbeitsfeld anstreben, ist zu empfehlen, die interdisziplinären Studienangebote an den Universitäten von Medizin, Botanik und Zoologie anzunehmen und vor allem sich mit der Physiologie der Organismen gründlich vertraut zu machen. Grundlagen der Biophysik, der Biochemie, von Bodenkunde und Hydrologie geben einen nützlichen Wissenshintergrund. Die notwendige, integrale Denkweise bei der Verbindung von Meteorologie mit dem Bios ist allerdings erst in der Berufserfahrung zu erwerben.

Literatur zur Einführung in die Biometeorologie

- BUDYKO, M. I.: Climate and life. New York, London: Academic Press 1974.
- CENA, K., CLARK, J. A.: Bioengineering. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Publishing Co. 1981.
- DE RUDDER, B.: Grundriß einer Meteorobiologie des Menschen. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer Verlag 1952.
- FAUST, V.: Biometeorologie. Stuttgart: Hippokrates Verlag 1976.
- GATES, D. M.: Man and his environment. New York: Harper and Row Inc. 1972.
- LANDSBERG, H. E.: Weather and Health. An Introduction to Biometeorology. New York: Doubleday and Co. Inc. 1969.
- LOWRY, W. P.: Weather and life. New York, London: Academic Press 1969.
- MONTEITH, J. L.: Grundzüge der Umweltphysik. Darmstadt: Dr. Steinkopff Verlag 1978.
- MUNN, R. E.: Biometeorological methods. New York, London: Academic Press 1970.
- TROMP, S. W.: Biometeorology. London: Heyden and Son Ltd. 1980.

2 P. HÖPPE, München Physikalische Prinzipien in der Biometeorologie

1 Einleitung

Ausgangspunkt für physikalische Betrachtungen in der Biometeorologie sind wie in anderen naturwissenschaftlichen Fachrichtungen die Gesetze der Erhaltung von Energie und Masse.

Eine Basis der modernen physikalischen Biometeorologie bilden die Energiebilanzgleichungen des Menschen, der Tiere und der Pflanzen, sowie die einzelnen Energieflüsse. Zur Aufstellung der Energiebilanzen sind vor allem Kenntnisse physikalischer Prinzipien der Wärmelehre und Thermodynamik notwendig. Im einzelnen müssen die Vorgänge der Wärmeleitung, des Wärmeüberganges an Grenzflächen, des turbulenten Wärmeaustausches zwischen der Umgebungsluft und den Körperoberflächen, der Phasenumwandlung, des Strahlungsenergie- und des Stoffaustausches betrachtet werden.

Im folgenden soll nicht auf die mikroskaligen Prozesse eingegangen werden, die sich in und an der einzelnen Zelle eines Lebewesens ereignen, sondern das Lebewesen als Ganzes und dessen Interaktion mit der Umwelt soll hier im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen.

Unter physikalischem Aspekt kann man viele Lebewesen, darunter den Menschen, mit kleinen Wärmekraftwerken vergleichen, die bestrebt sind, sich auf möglichst einfache Weise der nicht benötigten Wärme zu entsorgen. Dabei muß man zwischen den *homiothermen Lebewesen*, die eine nahezu konstante Kerntemperatur zur Aufrechterhaltung ihrer Lebensfunktionen haben müssen, und den *poikilothermen Lebewesen*, zu denen man auch die Pflanzen rechnen kann, unterscheiden. Die poikilothermen Lebewesen ändern ihre Temperatur mit den Umgebungsbedingungen und beschleunigen oder verlangsamen ihren Stoffwechsel bei Temperaturanstieg bzw. -abfall. Das homiotherme Lebewesen ist folglich das thermisch aktivere, da es durch körpereigene Thermoregulation bemüht ist, die Kerntemperatur zu halten. Bei den poikilothermen Lebewesen sind die thermoregulatorischen Funktionen nicht oder nur geringfügig ausgebildet; sie verhalten sich thermisch nahezu passiv.

Für jedes Lebewesen kann die Energiebilanz an einer Grenzfläche zur Umwelt in der annähernd gleichen Form formuliert werden, wobei in individuellen Fällen bestimmte Terme vernachlässigt werden können oder völlig entfallen (z.B. Schweißverdunstung bei Tieren, Atemanwärmung bei Pflanzen). Die Grenzfläche wird beim Menschen z.B. durch die Kleidungsoberfläche, beim Tier durch die Felloberfläche und bei Pflanzen durch die Blattoberfläche gebildet.

In der folgenden allgemeinen Energiebilanzgleichung werden Energieverluste des Körpers (Blattes) mit negativem Vorzeichen und Energiegewinne mit positiven Vorzeichen eingesetzt.

$$H + E_D + E_{SW} + R_n + C + S = 0 \quad (1)$$

In der Energiebilanzgleichung (1) sind folgende Terme enthalten, die gewöhnlich als Wärmeflußdichten in W/m^2 oder als Leistung in W angegeben werden:

- H: Körpereigene Wärmeproduktion durch exogene chemische Reaktionen der Nahrung oder von Speichersubstanzen mit Sauerstoff
 $H = M - A$, wobei M die gesamte durch den Metabolismus erzeugte Energie und A die in Arbeit umgewandelte Wärme ist
- E_D : Wasserdampfdiffusion vom Organismus in die Umgebungsluft
- E_{SW} : Verdunstung des transpirierten Wassers
- E_{Re} : Anwärmung und Wasserdampfsättigung der Atemluft
- R_n : Strahlungsbilanz
- C: Konduktion und Konvektion (fühlbare Wärme)
- S: Speicherung oder Entzug von Energie durch Anwärmung oder Abkühlung der Körpermasse des Lebewesens.

Am speziellen Beispiel des Menschen werden die Terme und deren Bedeutung im Beitrag von JENDRITZKY in diesem Heft noch näher behandelt. Die Energiebilanz und deren Terme können Aufschluß über das thermische Wohlbefinden von

Mensch und Tier, aber auch über Wachstum und Produktivität von Pflanzen und Nutztieren geben. Bevor die in der Energiebilanz enthaltenen physikalischen Prinzipien anhand der einzelnen Terme beschrieben werden, muß eine für alle Terme gleichermaßen bedeutende Größe erläutert werden. Diese Größe ist die Oberfläche des Lebewesens. Sie ist die Grenzfläche zwischen dem Organismus und der Umwelt. An ihr vollziehen sich die meisten Energieumsätze. Neben der Beschaffenheit der Oberfläche, wie Kleidung, Fell, Wachsschicht etc. ist die Größe der Oberfläche maßgebend für den Betrag der Energieumsätze. In den meisten Fällen läßt sich die Größe der Oberfläche nur schwer exakt berechnen, beispielsweise bei Bäumen und Insekten. Man bedient sich daher zur Abschätzung der Größe der Oberflächen Vereinfachungen, in denen Teile der Lebewesen geometrischen Körpern gleichgesetzt werden, deren Oberflächen leicht zu berechnen sind. So kann man sich z.B. die Arme, die Beine oder den Rumpf des menschlichen Körpers als Zylinder und den Kopf als Kugel vorstellen; die Oberfläche von Blättern einer Pflanze als Kreisflächen oder Ellipsen oder die Nadeln von Koniferen als Polyeder.

Eine empirische Formel zur Berechnung der Oberfläche eines Menschen wird im Beitrag von JENDRITZKY in diesem Heft erläutert.

Bis auf wenige Ausnahmen sind alle Terme der Energiebilanz zur Größe der Oberfläche direkt proportional. Ausnahmen stellen nur der Energieverlust bei der Atmung und, mit Einschränkungen die innere Wärme dar. Bei Bäumen bedient man sich gerne des Blattflächenindex, der das Verhältnis der Summe aller Oberflächen der Blätter, Nadeln o. ä. zu der Projektionsfläche des Baumes auf den Boden angibt. Durch den Blattflächenindex können die Oberflächenverhältnisse verschiedener Baumarten und Bestände charakterisiert oder miteinander verglichen werden.

2 Die innere Wärmeproduktion

Die innere Wärme entsteht bei Mensch und Tier durch Oxidation der aufgenommenen Nahrung mit dem Sauerstoff der eingeatmeten Luft und in unbedeutendem Maße bei der Respiration der Pflanzen. Bei Mensch und Tier kann die Oxidationswärme durch Analyse der Atemluft bestimmt werden, was am Beispiel des Menschen erläutert werden soll. Bei der Verbrennung von 1 g Kohlenhydrat werden 17,2 kJ, von 1 g Fett 38,9 kJ und von 1 g Eiweiß 17,2 kJ freigesetzt (LEHMANN, 1953). Der Grundumsatz, d. h. der zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen notwendige Umsatz beträgt bei einem Menschen mit einem Gewicht von 70 kg ca. 7100 kJ/d entsprechend ca. 82 W. Aus dem respiratorischen Quotienten RQ läßt sich die Stoffgruppe analysieren, die gerade an der Verbrennung beteiligt ist.

$$RQ = \text{gebildete Moleküle CO}_2 / \text{verbrauchte Moleküle O}_2 \quad (2)$$

Bei reiner Kohlenhydratverbrennung gilt $RQ = 1$, bei Eiweißverbrennung $RQ = 0,8$ und bei der Verbrennung von Fett $RQ = 0,7$ (LEHMANN, 1953).

Verrichtet das Lebewesen im physikalischen Sinne Arbeit, so wird je nach dem Wirkungsgrad ein Teil der Oxidationswärme in Arbeit umgewandelt und steht daher nicht mehr als innere Wärme zur Verfügung. Die physikalische Definition der Arbeit A lautet:

$$A = \int \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad (3)$$

wobei \vec{F} eine Kraft und \vec{s} der Weg, entlang dem die Kraft \vec{F} wirkt, ist. Wirkt eine Kraft parallel zum Weg \vec{s} und ist ihr Betrag konstant, so vereinfacht sich die Formel (3) zu

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \quad (4)$$

Viele Tätigkeiten von Lebewesen, wie das Heben von Lasten oder Verlagerungen des eigenen Schwerpunktes auf ein höheres Niveau, lassen sich energetisch sehr leicht mit der genannten Formel berechnen. Es gibt aber eine Vielzahl von Arbeitsvorgängen, die sich nicht so einfach auf diese Formel reduzieren lassen. Ein Beispiel dafür ist die Arbeit, die vom Herzen geleistet wird, um den Blutkreislauf zu gewährleisten, oder die Arbeit der Lungen während der Atmung.

Es ist außerdem oft schwer möglich, komplexe Bewegungsformen wie z. B. das Schreiben, Sport treiben o. ä. so aufzulösen, daß eine Berechnung der geleisteten Arbeit exakt möglich wird. Man wird sich der Einfachheit halber deshalb auf eine grobe Erfassung der geleisteten Arbeit beschränken und die unbedeutenderen Tätigkeiten vernachlässigen. Eine Berechtigung dazu liefert die Tatsache, daß der Wirkungsgrad der Arbeit sehr gering ist. Die Definition des Wirkungsgrades η lautet:

$$\eta = A / M \quad (5)$$

wobei A die Arbeitsleistung in W und M die gesamte durch die Oxidationsprozesse erzeugte innere Leistung (in W) darstellen. Der Wirkungsgrad ist also ein Maß für die „Effektivität“ der eingesetzten Energie. Nach FANGER (1970) liegt der Wirkungsgrad beim Menschen zwischen 0 und 20%. Der Wirkungsgrad ist verglichen mit Wärmekraftmaschinen sehr gering. Daher muß der Körper bei härterer Arbeit durch Verdunstung von Schweiß für Abkühlung sorgen, um die nun im überproportionalen Maße anfallende innere Wärme zu kompensieren. Homoiotherme Lebewesen sind also im physikalischen Sinne Wärmekraftmaschinen, die den größten Teil der eingesetzten Energie zur eigenen Beheizung und nicht zur Arbeitsleistung verbrauchen. Poikilotherme Lebewesen dagegen richten ihre Arbeitsleistung nach den äußeren Bedingungen. Sind die thermischen Bedingungen günstig, so wächst die Arbeitsleistung, sind sie ungünstig, so sinkt die geleistete Arbeit auf nahezu Null.

3 Die Schweißverdunstung

Die physikalische Erfassung des Energieverlustes durch Schweißverdunstung an Lebewesen (Transpiration) stellt ein sehr komplexes Problem dar. Grundsätzlich sind 2 Fälle zu differenzieren.

1. Die Schweißproduktion ist geringer als die von den meteorologischen Umgebungsparametern abhängige mögliche (potentielle) Verdunstung. In diesem Falle stellt sich das Problem mehr als ein physiologisches denn als ein physikalisches dar. Man muß die Physiologie der Transpiration der zu betrachtenden Lebewesen kennen, um die Schweißproduktion, die sogenannte Schweißrate (l/h) zu kennen. Im betrachteten Fall verdunstet der gesamte produzierte Schweiß und die dem Lebewesen dadurch entzogene Energie E_{sw1} berechnet sich sehr einfach zu:

$$E_{sw1} = -m_{H_2O} \cdot r \quad (6)$$

wobei m_{H_2O} die Menge des aus den Poren transportierten Wassers und r die Verdunstungswärme des Wassers bei der entsprechenden Oberflächentemperatur ist.

2. Die Schweißproduktion ist höher als die potentielle Verdunstung. In diesem Fall ist die physikalisch maximal mögliche Verdunstung, die von der Temperatur, der Feuchte und der Windgeschwindigkeit der Umgebung, sowie von der Temperatur und der Rauigkeit der Oberfläche und den allgemeinen Strahlungsbedingungen abhängt, die limitierende Größe. Zur Berechnung der Verdunstung an Lebewesen eignet sich am besten die von DALTON entwickelte Verdunstungsformel. Sie ergibt sich aus der Analogiebetrachtung von fühlbarem und latentem Wärmestrom.

Der fühlbare Wärmestrom wird allgemein angesetzt zu:

$$L = -\alpha_1 \cdot (T_o - T_a) = -\frac{\alpha_1}{c_p} \cdot [c_p \cdot (T_o - T_a)] \quad (7)$$

wobei α_1 die Wärmeübergangszahl, T_o die Temperatur der Oberfläche des Lebewesens, T_a die Temperatur der Umgebungsluft und c die spezifische Wärmekapazität von Luft ist. Ersetzt man nun die spezifische Enthalpiedifferenz durch die Differenz der spezifischen Feuchten so erhält man:

$$c_p \cdot (T_o - T_a) - s(E) - s(e_1) = \frac{0,623}{p} \cdot (E - e_1) \quad (8)$$

$$E_{Sw2} = -\frac{0,623}{p \cdot c_p} \cdot \alpha_1 \cdot (E - e_1) \quad (9)$$

wobei s die spezifische Feuchte, E der Sättigungsdampfdruck bei der Oberflächentemperatur T_o des Lebewesens, e_1 der Dampfdruck des Wasserdampfes in der Umgebungsluft und p der Luftdruck sind. Die genannte Formel (9) eignet sich hier gut, da die Oberflächentemperaturen der Lebewesen mit Infrarotthermometern heute gut zu erfassen sind. Um die gesamte Schweißverdunstung des Lebewesens zu berechnen, muß die Gleichung (9) noch mit der Größe der benetzten Oberfläche multipliziert werden. Viele Autoren paßten die Verdunstungsformel noch etwas mehr den biometeorologischen Verhältnissen an, indem sie z.B. zusätzlich einen Durchlässigkeitsfaktor definieren, der ein Maß für den Widerstand des Wasserdampftransportes durch die Kleidung oder das Fell ist. Ein Beispiel für den Menschen wird im Beitrag von JENDRITZKY in diesem Heft beschrieben.

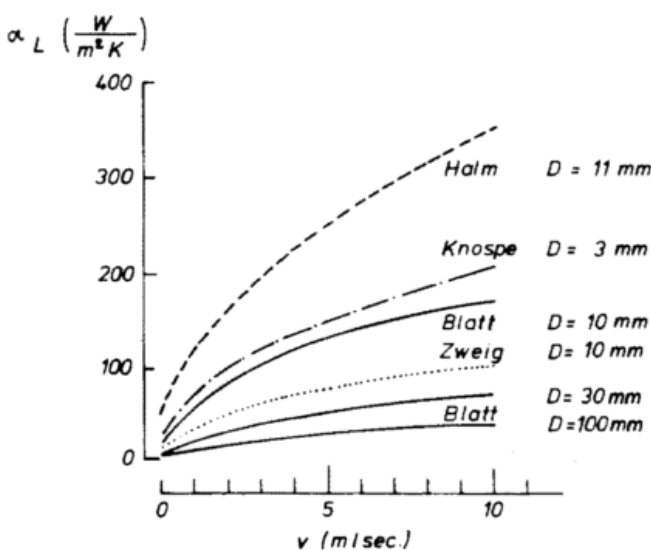


Abb. 1: Die Wärmeübergangszahl α_1 verschiedener Pflanzenkörper in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v und dem Durchmesser D (nach BAUMGARTNER, 1973).

Die größte Schwierigkeit bei der Anwendung dieser Formel dürfte darin bestehen, die Wärmeübergangszahl richtig anzusetzen. Hierzu gibt es jedoch in der human- und phytobiometeorologischen Literatur empirische Gleichungen, in denen α_1 als Funktion der Windgeschwindigkeit für eine bestimmte geometrische Form und eine genaue definierte Position angegeben ist. Ein Beispiel dafür ist die Abbildung 1, in der nach BAUMGARTNER (1973) die Wärmeübergangszahl α_1 von verschiedenen Pflanzenkörpern als Funktion der Windgeschwindigkeit angegeben ist. Näher wird auf die Wärmeübergangszahl noch im Abschnitt Konvektion eingegangen werden.

4 Die Wasserdampfdiffusion

Außer durch die aktiven Transpirationsprozesse verlieren die Lebewesen auch durch die insensible Diffusion Wasser. Bei diesem Vorgang diffundiert Wasser durch Haut, Fell, Kleidung oder Blattoberflächen in die Umgebungsluft. Nach dem Fick'schen Diffusionsgesetz gilt:

$$\frac{dn}{dt} = D_k \cdot A \cdot \frac{dc}{dx} \quad (10)$$

wobei n die Anzahl der diffundierenden Moleküle, t die Zeit, D_k der Diffusionskoeffizient in m^2/s , c die Konzentration des diffundierenden Stoffes, x ein Längenmaß für das Konzentrationsgefälle und A die Fläche ist. Um die Energie, die auf diese Weise dem Lebewesen entzogen wird zu berechnen muß die Gleichung (10) mit der Verdunstungswärme von Wasser bei der entsprechenden Temperatur und mit dem Molgewicht multipliziert werden. Die Konzentration des Wasserdampfes kann aber auch durch den gebräuchlichen Dampfdruck ersetzt werden. Bei einem Molgewicht von 18 g für Wasser gilt: $1 \text{ Mol}/m^3 \cong 24,4 \text{ mbar}$ (bei $T_a = 16^\circ C$). Den größten Diffusionswiderstand bilden nicht etwa die Kleidung oder das Fell, die einen relativ großen Diffusionskoeffizienten besitzen, sondern die tieferen Schichten der Hornschicht der Epidermis. Bei Pflanzen geht der hauptsächliche Widerstand von der Kutikula bzw. deren Wachsschicht aus.

5 Die Konvektion und Konduktion

Der Konvektionsterm beschreibt den Strom fühlbarer Wärme zwischen der Umgebungsluft und der Oberfläche des betrachteten Lebewesens. Er umfaßt sowohl den Wärmeübergang durch Konduktion (Leitung) als auch durch Konvektion. Obwohl in den meisten Situationen die Konvektion um Größenordnungen bedeutender als die Konduktion ist, kann letztere manchmal eine entscheidende Rolle spielen. Dann nämlich, wenn ein Lebewesen direkten Kontakt zu einem Festkörper wie z.B. der Sitzfläche eines Stuhles oder auch des Erdbodens hat. Der Wärmestrom vom Organismus zum Festkörper oder umgekehrt berechnet sich dann zu:

$$C = -\lambda \cdot \Delta T \quad (11)$$

wobei λ die Wärmeübergangszahl und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen den Oberflächen ist; er kann experimentell bestimmt werden, oder als Funktion der Wärmeleitfähigkeiten der beteiligten Materialien analog der Gesetze bei der Reihenschaltung von elektrischen Widerständen berechnet werden.

In den überwiegenden Problemstellungen in der physikalischen Biometeorologie, in denen sich ein Organismus in der Grenzschicht der Atmosphäre bewegt, wird der Strom fühlbarer Wärme von konvektiven Vorgängen bestimmt. Da die

Konvektion eine mathematisch schwer zu beschreibende Größe darstellt, versucht man durch Ähnlichkeitsbetrachtungen Aufschluß über die Größe des konvektiven Wärmeflusses zu bekommen. Man benützt dazu dem zu untersuchenden Lebewesen ähnliche Kunstkörper, die man mit kalorimetrischen Methoden in verschiedenen Klimabedingungen untersucht. Mit Hilfe der Meßwerte können empirische Wärmeübergangszahlen gefunden werden, die sich für einen bestimmten Körpertypus als Funktion der Windgeschwindigkeit oder der Temperaturdifferenz ausdrücken lassen. Der konvektive Wärmefluß folgt dann ebenso dem Gesetz:

$$C = -b \cdot \Delta T \quad (12)$$

wobei nun b eine Wärmeübergangszahl für den turbulenten Wärmeaustausch ist. Im Fall von erzwungener Konvektion ist b eine Funktion der Windgeschwindigkeit und im Fall freier Konvektion eine Funktion der Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und dem umgebenden Medium. Zwischen beiden Formen gibt es einen Übergangsbereich, in dem sie additiv wirken. In beiden Fällen ist zu berücksichtigen, ob die Strömung turbulenten oder laminaren Charakter besitzt, da eine turbulente Wärmeübergangszahl quantitativ wesentlich größer ist als eine laminare. Aufschluß über Turbulenz oder Laminarität der Konvektion gibt die sogenannte Grashof-Zahl Gr , die am Beispiel eines stehenden Menschen bei freier Konvektion lautet (aus CLARK et al., 1981):

$$Gr = \frac{g \cdot h^3 \cdot (T_o - T_a)}{\nu^2 \cdot T_a} \quad (13)$$

wobei g die Erdbeschleunigung, h die vertikale Höhe der Strömung am Körper ($h = 0$ an der Fußsohle), T_o die Oberflächentemperatur des Körpers, T_a die Lufttemperatur der Umgebung und ν die kinematische Viskosität der Luft ist. Aus experimentellen Untersuchungen ging hervor, daß, solange $Gr < 10^9$, die Strömung laminar am Körper empor steigt und, sobald $Gr > 10^{10}$, die Strömung vollständig turbulent ist.

Im Falle der erzwungenen Konvektion gibt die Reynoldssche Zahl Re Aufschluß über den Charakter der Strömung.

$$Re = \frac{l \cdot v}{\nu} \quad (14)$$

wobei l eine charakteristische Länge des Körpers, v die relative Geschwindigkeit zwischen Medium und Körper und ν die kinematische Viskosität ist. Die Größe der kritischen Reynoldszahl, die den Umschlag von laminarer in turbulente Strömung anzeigt, hängt jedoch sehr von den Oberflächenverhältnissen des Körpers und der Art der aufgezungenen Strömung ab. Die kritischen Werte liegen meist bei 1000–10000 (MONTEITH, 1973). Um den konvektiven Wärmeübergang von geometrisch ähnlichen Körpern allgemein zu erfassen, ist es zweckmäßig die Wärmeübergangszahl als Faktor der Nusselt-Zahl Nu anzugeben ($b = f(Nu)$), die sich nach folgender Formel berechnet:

$$Nu = \frac{d}{\delta} \quad (15)$$

wobei d eine charakteristische Größe des Körpers und δ die Grenzschichtdicke darstellt. Die Nusselt-Zahl ermöglicht es, den konvektiven Wärmefluß geometrisch ähnlicher Körper für definierte Windgeschwindigkeiten anzugeben. Eine Reihe experimentell bestimmter Nusselt-Zahlen hat MONTEITH (1973) mitgeteilt. In Abbildung 2 ist die Nusselt-Zahl als Funktion der Reynolds-Zahl für einen senkrecht zur Achse angeströmten Zylinder mit 30 cm Durchmesser, für ein Schaf und für den Menschen dargestellt.

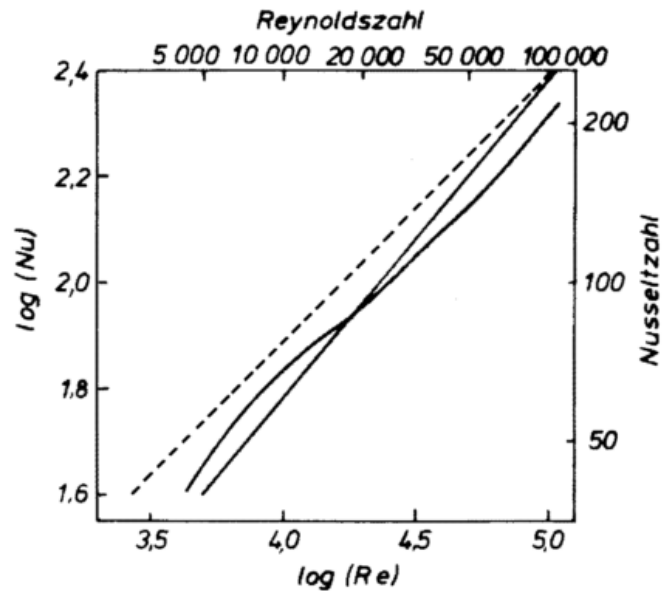


Abb. 2: Nusselt-Zahl als Funktion der Reynolds-Zahl für senkrecht zur Achse angeströmte Zylinder mit 30 cm Durchmesser (durchgezogene Gerade); experimentell gefundene Nusselt-Zahlen von Schafen (durchgezogene Kurve) und Menschen (gestrichelt); nach MONTEITH (1978).

Bei freier Konvektion läßt sich die Nusselt-Zahl als Funktion der Grashof-Zahl und bei erzwungener Konvektion als Funktion der Reynolds-Zahl berechnen. Durch derartige Ähnlichkeitsverfahren ist es möglich, in gezielten experimentellen Untersuchungen im Windkanal die Wärmeübergangszahlen der Organismen und Körper zu quantifizieren.

6 Die Strahlungsenergie

Die Strahlungsbilanz der Oberfläche eines Lebewesens stellt den Energiegewinn bzw. -verlust eines Organismus an Strahlungsenergie dar. Die Strahlungsbilanz oder auch Nettostrahlung setzt sich aus folgenden kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen zusammen:

$$R_n = S + D + r + E + A + R + K \quad (16)$$

wobei S die direkte Sonnenstrahlung, D die diffuse Himmelsstrahlung, r die kurzwellige Reflexstrahlung, E die Ausstrahlung des Bodens und der umgebenden Oberflächen, A die atmosphärische Gegenstrahlung, R die langwellige Reflexstrahlung (meist vernachlässigbar) und K die Ausstrahlung des Lebewesens ist. Die Herkunft und Richtung der einzelnen Strahlungsflüsse sind in Abbildung 3 veranschaulicht.

Die Berechnung des Strahlungsenergiegewinnes aus der Umgebung stellt ein sehr komplexes Problem dar. Er setzt sich aus kurzwelligen und langwelligen Anteilen zusammen, die in unterschiedlichen Anteilen absorbiert werden. Bei der Absorption von gerichteter kurzwelliger Strahlung ist nicht die wirkliche Oberfläche des zu betrachtenden Körpers maßgebend, sondern nur dessen Projektionsfläche senkrecht zur Einstrahlungsrichtung. MONTEITH (1978) veranschaulicht dies an einem Beispiel, in dem die direkte Sonnenstrahlung auf einen unregelmäßig geformten Körper dargestellt ist, und die Berechnung des effektiven Strahlungsgenusses daraus des

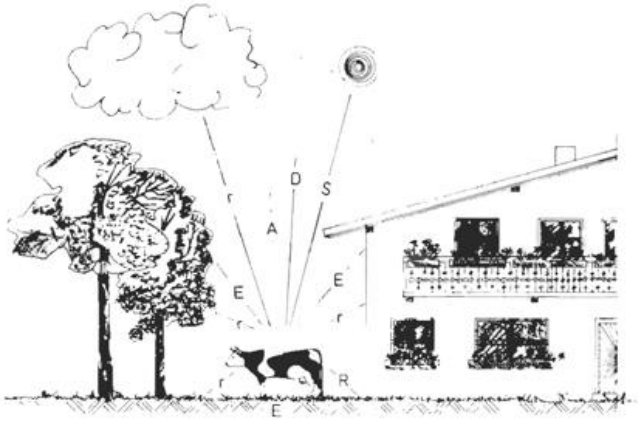


Abb. 3: Strahlungsflüsse auf ein Lebewesen unter Freilandbedingungen am Beispiel einer Kuh.

Körpers gezeigt wird (Abb. 4). Der effektive Strahlungsgenuß S_{eff} ergibt sich zu:

$$S_{eff} = \sin\beta \cdot A_h \cdot S \quad (17)$$

wobei β die Sonnenhöhe, A_h die Schattenfläche und S die direkte Sonnenstrahlung auf eine Fläche senkrecht zur Einstrahlungsrichtung ist. Kennt man also die Strahlungsflußdichte der direkten Sonnenstrahlung, so kann man den Strahlungsgewinn an direkter Sonnenstrahlung eines Körpers aus seiner Schattenfläche berechnen. Dazu ist natürlich noch die Kenntnis der Albedo notwendig.

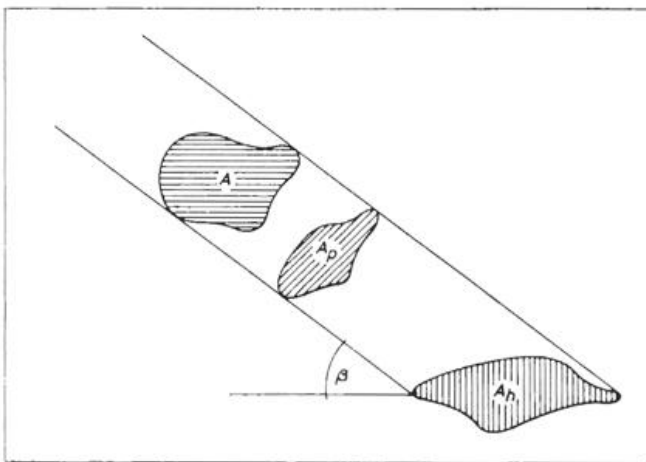


Abb. 4: Bestrahlung eines unregelmäßig geformten Körpers durch die direkte Sonnenstrahlung (nach MONTEITH, 1978).

Schwieriger ist es schon den Strahlungsgenuß durch die diffuse Himmelsstrahlung zu erfassen, da sie aus dem gesamten oberen Halbraum in differenzierter Verteilung auf das Lebewesen fällt. Zur Vereinfachung des Problems bieten sich die Annahmen an, daß die Empfängerfläche der Hälfte der wirksamen Oberfläche des langwelligen Strahlungsaustausches entspricht, und dabei die diffuse Himmelsstrahlung eine gleiche Verteilung über den gesamten oberen Halbraum aufweist.

Eine grundlegende Gleichung zur Berechnung der Strahlungs-

flüsse vor allem im langwelligen Bereich stellt das Strahlungsgesetz von Stefan Boltzmann dar. Es lautet:

$$E = -\epsilon \cdot \sigma \cdot T_0^4 \quad (18)$$

wobei ϵ der materialspezifische Emissionskoeffizient, σ die universelle Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) und T_0 die Oberflächentemperatur des Körpers darstellt. Bei nichtmetallischen Oberflächen, wie sie bei allen Lebewesen anzutreffen sind, liegt der Emissionskoeffizient im Bereich von 0,9 bis 1,0. Die vom Körper eines Lebewesens emittierte Strahlungsenergie K läßt sich jedoch selbst dann, wenn die Oberflächentemperatur und der Emissionskoeffizient bekannt sind, nicht ohne Schwierigkeiten berechnen. Erschwerend für die Berechnung wirkt die Komplexität der Gliederung der Oberflächen, wenn z. B. Anteile der Oberfläche in gegenseitigem Strahlungsaustausch stehen (Innenseite der Oberschenkel, Blätter in einer Baumkrone). Es muß daher die aktuelle Oberfläche auf eine effektiv wirksame Oberfläche reduziert werden. Werte und Ansätze dafür sind für den Menschen in FANGER (1970) und für Pflanzen in MONTEITH (1978) zu finden.

In den meisten natürlichen Situationen wird die Berechnung der Strahlungsflüsse noch durch eine Horizontüberhöhung erschwert. Die Horizontüberhöhung wirkt sich in einer Reduzierung der beiden Komponenten der Globalstrahlung und in einer Steigerung der kurzwelligen Reflexstrahlung und der langwelligen Ausstrahlung der Umgebung aus. Zur Berechnung des Einflusses der Horizontüberhöhung muß deren Raumwinkel erfaßt werden. Nomogramme dazu sind bei JENDRITZKY et al. (1981) veröffentlicht.

Aufgrund der erwähnten komplexen Verhältnisse ist man dazu übergegangen, als charakteristische Größe für die „Strahlungsumgebung“ eine mittlere Strahlungstemperatur zu definieren. Sie wird über die oben genannten Methoden als die einheitliche Temperatur berechnet, die eine schwarz strahlende Umgebung hat, wenn sie zu der selben aktuellen Strahlungsbilanz führen würde. Mit Einführung dieser mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} , die sowohl langwellige als auch kurzwellige Strahlungsströme berücksichtigt, vereinfacht sich die Formel zur Berechnung der Strahlungsbilanz in der Energiebilanz von Lebewesen zu:

$$R_n = \epsilon \cdot \sigma (T_{mrt}^4 - T_0^4) \quad (19)$$

wobei T_{mrt} die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung und T_0 die Oberflächentemperatur des Lebewesens (jeweils in K) darstellt.

7 Der Energieaustausch durch die Atmung

Der Energieaustausch durch Anwärmen und Anfeuchten der Atemluft ist beim Menschen und vor allem auch bei Tieren, die keine vergleichbaren Schweißdrüsen besitzen, von Bedeutung. Die oberen Atemwege des Menschen und einer großen Anzahl von Tieren arbeiten nach dem Prinzip von technischen Gegenstromregeneratoren. Während die Inspirationsluft durch die oberen Atemwege strömt, wird sie thermisch den Körperbedingungen angepaßt und mit Wasserdampf gesättigt. Bei der Expiration kehren sich die Vorzeichen des Energie- und Wasseraustausches wieder um, jedoch enthält die Atemluft bei Verlassen des Körpers in der Regel mehr fühlbare Wärme und mehr Wasserdampf als beim Eintritt in den Körper. Bei der Aufstellung der Atemenergiebilanz sind

gewöhnlich nicht die lokalen und kurzzeitigen Vorgänge im Atemtrakt während eines Atemzuges, sondern die Summe des Energieentzuges während der Atmung als Mittel über einen längeren Zeitraum von Interesse. Will man diesen Energieentzug berechnen, so muß man die Differenz des Energieinhaltes der Atemluft vor dem Einatmen und nach dem Ausatmen berechnen. Die Energiedifferenz setzt sich aus einem Anteil fühlbarer Wärme und aus einem latenten Anteil, der der Energie entspricht, die notwendig ist, um das zusätzliche Wasser in die Atemluft zu verdunsten (ABEL et al., 1977). Der fühlbare Anteil berechnet sich zu:

$$E_{\text{Ref}} = m_1 \cdot c \cdot \Delta T \quad (20)$$

und der latente Anteil zu:

$$E_{\text{Rel}} = m_1 \cdot \frac{0,623 \cdot r}{p} \cdot \Delta e \quad (21)$$

wobei m_1 die Masse der Atemluft pro Zeiteinheit, c die Wärmekapazität der Atemluft, ΔT die Differenz zwischen der Lufttemperatur vor dem Einatmen und beim Verlassen des Körpers, r die Verdunstungswärme, p der Luftdruck, und Δe die Differenz der Dampfdrücke der Atemluft vor und nach der Respiration darstellen.

In der Regel ist die Expirationsluft wärmer und feuchter als die Inspirationsluft, d. h. der latente und fühlbare Anteil der Atembilanz haben gleiches Vorzeichen und entziehen dem Körper Energie. Der Faktor m (Masse der Respirationluft) läßt sich leicht als Produkt des Atemzeitvolumens (l/h) und der Dichte der Luft berechnen, das z. B. für den Menschen aus einer Vielzahl von Tabellenwerken zu entnehmen ist. Die Differenz ΔT wird aus der Lufttemperatur der Umgebungsluft (Inspirationstemperatur) und der Temperatur der ausgeatmeten Luft (Expirationstemperatur) gebildet. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Expirationstemperatur nicht konstant ist, sondern vielmehr von der Inspirationstemperatur abhängt. Bei der Differenzbildung Δe kann man mit großer Genauigkeit davon ausgehen, daß die Expirationsluft mit Wasserdampf gesättigt ist, daß also deren Dampfdruck dem Sättigungsdampfdruck bei der Expirationstemperatur entspricht.

8 Die Wärmespeicherung im Körper

Der Wärmespeicherung liegt der 1. Hauptsatz der Thermodynamik zugrunde, der besagt, daß die Änderung des Wärmeinhaltes eines Körpers der Summe aus der Änderung seiner inneren Energie und der geleisteten Arbeit entspricht.

$$dQ = dU + dA \quad (22)$$

Im Falle des hier betrachteten Speichertermes kann die Arbeitsleistung zu 0 gesetzt werden. Der Speicherterm $S (= dQ)$ berechnet sich, wenn man von der differentiellen zur Differenzschreibweise übergeht zu:

$$S = \Delta Q = \Delta U = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (23)$$

wobei c die Wärmekapazität des Körpers, m seine Masse, und ΔT die Temperaturänderung der Körpersubstanz ist.

Der Speicherterm wird jedoch meistens als letztes Glied der Energiebilanz aus der Summe der anderen Terme berechnet; in vielen Fällen dient das Aufstellen der Energiebilanz letztlich nur dem Zweck, eine Aussage über den Speicherterm zuzulassen. Der Speicherterm kann auch nach der Bestimmung von c und der Messung von ΔT direkt berechnet werden. Dabei ist zu beachten, daß biologische Körper aus verschiedenartigen

Stoffen mit unterschiedlichen Wärmekapazitäten bestehen, die jedoch hauptsächlich in der Größenordnung von Wasser liegen, das den wichtigsten Bestandteil der Lebewesen darstellt. Auch muß sich eine Temperaturerhöhung nicht in allen Gewebeschichten gleichmäßig durchsetzen. Der Anteil der an Temperaturänderungen beteiligten Gewebeschichten ist daher auch zu erfassen.

Biologische Systeme können nicht beliebig viel Wärme speichern. Für jedes Lebewesen gibt es Grenzwerte der Wärmespeicherung oder des Wärmeverlustes, bis zu denen die Aufrechterhaltung der notwendigen Lebensfunktionen möglich ist. Die Grenzwerte sind meist in Form von Letaltemperaturen für viele Organismen bekannt.

9 Schlußbemerkung

Die erläuterten physikalischen Prinzipien stellen natürlich keine erschöpfende Auflistung aller in der Biometeorologie benötigten physikalischen Grundlagen dar. Auch ist die Darlegung der einzelnen Prozesse sicher nicht detailliert genug, um die ganze Physik, die hinter den in der Biometeorologie untersuchten Vorgängen steht, darzulegen. Es sollte vielmehr aufgezeigt werden, daß sich die moderne Biometeorologie als Teilgebiet der Meteorologie und damit als eine physikalisch fundierte Forschungsrichtung versteht, in der mit physikalischen Methoden versucht wird, die Einflüsse der Biosphäre auf die Lebewesen zu erforschen.

Literatur

- ABEL, H., BAUMGARTNER, A., DONLE, W.: Die Energie- und Wasserumsätze bei der Atmung. *Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München*, Nr. 28 (1977).
- BAUMGARTNER, A.: Estimation of the Radiation and Thermal Micro-Environment from Meteorological and Plant Parameters. In: *Plant Response to Climatic Factors*, UNESCO, Proc. Uppsala Symp., 1970.
- BÜTTNER, K.: *Physikalische Bioklimatologie*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1938.
- CENA, K.; CLARK, J. A.: *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Publishing Company, 1981.
- FANGER, P. O.: *Thermal Comfort*. Düsseldorf, London, New York: McGraw-Hill-Book Company, 1970.
- GATES, D. M.: *Biophysical Ecology*. New York, Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 1980.
- JENDRITZKY, G.; NÜBLER, W.: A Model Analysing the Urban Thermal Environment in Physiological Significant Terms. *Arch. Meteorol. Geoph. Biokl., Ser. B*, (1981) S. 313—326.
- KERSLAKE, D. Mck.: *The Stress of Hot Environments*. Cambridge: Cambridge University Press, 1972.
- LEHMANN, G.: *Praktische Arbeitsphysiologie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1953.
- MONTEITH, J. L.: *Grundzüge der Umweltphysik*. Darmstadt: Dr. Steinkopff Verlag, 1978.
- MONTEITH, J. L.; MOUNT, L. E.: *Heat Loss from Animals and Man*. London: Butterworth, 1974.
- MUNN, R. E.: *Biometeorological Methods*. New York, London: Academic Press, 1970.

3

Zur Wirkung mikrometeorologischer und biophysikalischer Vorgänge auf die pflanzliche Produktion

1 Problemstellung

Die Landwirtschaft in der Bundesrepublik befindet sich mehr als irgendein anderer Wirtschaftszweig im Spannungsfeld zwischen ökonomischen Interessen und ökologischen Zwängen. Nach einer Zeit, in der das Ertragsniveau mit Hilfe der Agrartechnik und Agrarchemie erheblich gesteigert werden konnte, beginnt in dieser Hinsicht eine Phase der Konsolidierung. Es wird eine Verbesserung der Stabilität und Qualität der Produkte angestrebt bei gleichzeitiger Reduktion des Aufwandes an Produktionsmitteln wie dem Einsatz von Maschinen und Beregnungswasser. Auf der anderen Seite zwingen ökologische Probleme zu neuen Konzeptionen im Ackerbau. Durch gezielteren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und bessere Dosierung des Mineraldüngers entsprechend dem tatsächlichen Bedarf des Bodens sollen der Aufwand an chemischen Mitteln und die Gefahr einer negativen Beeinflussung des Grundwassers reduziert werden. Durch eine teilweise reduzierte mechanische Bodenbearbeitung soll dieses Biotop für die Bodenlebewesen verbessert werden, und durch gesteuerte Veränderungen in der Landnutzung strebt man eine Verringerung der Verdunstung und eine Steigerung des nutzbaren Wasserdargebotes an.

Gleichzeitig kommen auf die Landwirtschaft Mitteleuropas neue Aufgaben zu. Zur reinen Nahrungsmittelproduktion kommt die Erzeugung industriell verwertbarer Rohstoffe. Außer den bereits früher angebauten Pflanzen zur Gewinnung von Faserstoffen und Arzneien sollen nun auch Pflanzen angebaut werden, die sich zur Herstellung von Ethanol, Methanol, technischen Ölen und Fetten und anderen Industrie-Grundstoffen eignen oder direkt als Energieträger z. B. zur Erzeugung von Biogas verwendbar sind. Hier wird eine Erhöhung der Assimilatproduktion und -speicherung in der organischen Masse angestrebt, also eine Verbesserung der Ausnutzung der Solarenergie und der Umwandlung in Biomasse. Der Wirkungsgrad solcher „Solaranlagen“ ist jedoch noch äußerst niedrig, denn von der Globalstrahlung gehen ca. 35% durch Reflexion und langwellige Nettoausstrahlung verloren und von der verbleibenden Energieausbeute der Strahlungsbilanz werden 60–80% für die Verdunstung verbraucht und nur 1–3% in der Biomasse durch Photosynthese gespeichert. Der Nutzungsgrad ist abhängig von den örtlichen Wetter- und Klimabedingungen, den ertragsphysiologischen Eigenschaften der Pflanzen und nicht zuletzt von den morphologischen Eigenschaften der Pflanzenteile und des Bestandes, welche das Bestandsklima im Bereich der eigentlichen Energieumsatzflächen beeinflussen. Die Mithilfe bei der Steigerung der Energienutzung durch forstliche und landwirtschaftliche Kulturpflanzen dürfte zu den wichtigsten biometeorologischen Forschungsaufgaben der Zukunft gehören.

Die bisher für die wetterdienstliche Beratung der Landwirtschaft benutzten empirischen Beziehungen zwischen meteorologischen Parametern und pflanzlicher Entwicklung werden den nun entstehenden Anforderungen nicht mehr gerecht, zu-

mal die Wechselwirkung zwischen Pflanze und physikalisch-meteorologischer Umwelt vor allem auf dem Weg über den Energie- und den Wasserhaushalt erfolgt.

2 Abhängigkeit biologischer Vorgänge von ökologischen Bedingungen

Ziel der agrarmeteorologischen Arbeitskonzeption muß also zunächst sein, die Beziehungen zwischen Energiehaushaltsgrößen und dem Leistungsverhalten der Kulturpflanzen unter Berücksichtigung der individuellen Assimilationsmechanismen zu analysieren. Hier sind die Vorgänge bei der Photosynthese, der Respiration und der Transpiration und untrennbar davon diejenigen der Öffnungs- und Schließbewegung der Blattoberflächen, der Stomata, von fundamentaler Bedeutung.

2.1 Einfluß bestandsmeteorologischer Parameter auf die Photosynthese

Die Assimilation des Kohlendioxids und der Aufbau organischer Substanz aus CO_2 und H_2O in den Blättern erfolgt mit Hilfe der photosynthetischen aktiven Strahlung PAR, einem Teil der Globalstrahlung, welcher wegen der Absorptionseigenschaften des Chlorophylls etwa im Bereich des Sichtbaren liegt, aber zwei Maxima bei 0,45 und 0,67 μm und ein relatives Minimum bei 0,55 μm , also etwa bei der maximalen Empfindlichkeit des Auges hat. Dieser spezielle Strahlungsanteil ist quantenmechanisch festgelegt und notwendig, um die Wassermoleküle aufzuspalten und die äußeren Elektronen auf eine höhere Energiestufe zu bringen, damit eine Reaktion mit dem CO_2 möglich wird. Der an anderer Stelle ausführlicher geschilderte Calvin-Benson-Zyklus (v. HOYNINGEN-HUENE und BRAMM, 1981), welcher die Synthese der Kohlehydrate unter Ausnutzung der PAR bewirkt, ist somit der eigentliche Energiekollektor. Hier wird speicherbare biochemische Energie aus dem Energiestrom der Strahlung aufgebaut, wobei der Wirkungsgrad vom CO_2 -Angebot und von der Blattertemperatur abhängt.

Gleichzeitig mit der Photosynthese wird aber ein Teil des gebundenen CO_2 durch Lichtatmung wieder freigesetzt. Diese Respiration beschleunigt sich mit zunehmender Blattertemperatur wesentlich stärker als die Assimilation, so daß die Nettoassimilationsrate als Differenz aus beiden Vorgängen ein Maximum zeigen muß. Die Lage dieses Optimums ist von der Pflanzenart abhängig, wie Abbildung 1 zeigt. Deutlich wird aus der Darstellung, daß es unterschiedliche Reaktionstypen gibt.

Einer Gruppe von Pflanzen, den sogenannten C_3 -Pflanzen, mit relativ schwacher Photosyntheseleistung und niedriger Optimaltemperatur, wie der Zuckerrübe und den meisten mitteleuropäischen Kultur- und Wildpflanzen steht ein Pflanzentyp, der C_4 -Typ, gegenüber, der offensichtlich Strahlung und CO_2 besser umsetzt, aber höhere Temperatursprüche hat. Dazu gehören Mais, Reis, Zuckerrohr und viele Hirsearten

(Sorghum), die meist aus trocken-warmen Ländern stammen und bei denen dem oben beschriebenen Photosyntheszyklus ein weiterer Kreislauf angeschlossen ist. Dieser bewirkt eine erheblich effektivere Photosynthese und verhindert, daß sofort wieder ein wesentlicher Anteil des Assimilats veratmet wird.

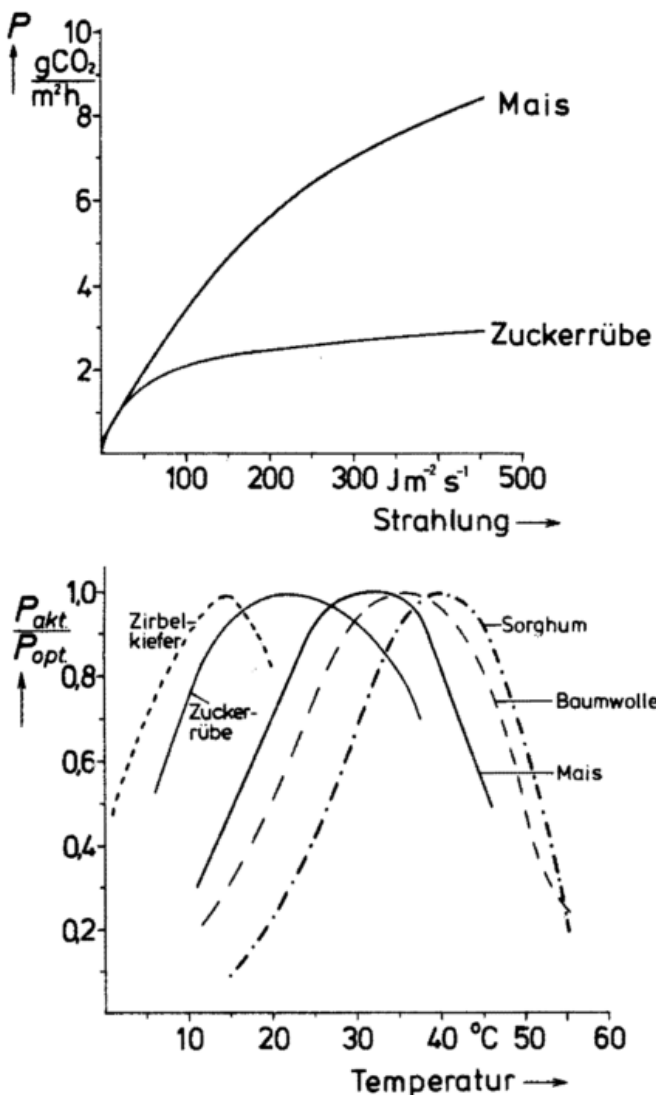


Abb. 1: Oben: Spezifische Nettophotosynthese verschiedener Pflanzen, gemessen am CO_2 -Verbrauch in Abhängigkeit von der Strahlung. Unten: Verhältnis von aktueller P_{akt} und optimaler Photosynthese P_{opt} als Funktion der Blattemperatur. Nach TRANQUILLINI (1955), de WIT et al. (1978) und O'ROURKE und TERJUNG (1981).

2.2 Die Spaltöffnungen als steuernde Elemente für Assimilation und Transpiration

Für Transpiration und Assimilation ist der Transport von Wasser, Sauerstoff und Kohlendioxid notwendig. Ihr Austausch zwischen Pflanze und Atmosphäre erfolgt durch verschiedene Schichten in und über dem Bestand nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Im Promet-Heft Nr. 5 (v. HOYNINGEN-HUENE, 1975) wurde bereits beschrieben, wie die

Widerstände gegen den Wassertransport angeordnet sind. Der wichtigste davon, welcher zudem von der Pflanze selbst geregelt werden kann, liegt in den veränderlichen Porenöffnungen an der Blattaußenhaut. Sie können zum Schutz gegen Austrocknen oder gegen einen zu geringen CO_2 -Gehalt im Blatt geschlossen werden. In den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte in den Kenntnissen der Abhängigkeit der Spaltöffnungswiderstände von pflanzlichen und mikrometeorologischen Bedingungen gemacht. Zu den pflanzlichen Einflußfaktoren gehören die CO_2 -Konzentration in den Blatthohlräumen (Interzellularen), die Hydratur des Blattgewebes, der Ionenhaushalt und Phytohormone; zu den meteorologischen bzw. äußeren Parametern die Strahlung, Temperatur und relative Feuchte sowie der Wassergehalt des Bodens. Diese Vielzahl von Parametern beeinflussen sich wiederum untereinander, so daß eine analytische Beschreibung der Abhängigkeit schwierig ist. Mit Hilfe einer statistischen Analyse eines großen Kollektivs von über 500 im Freiland gewonnenen Einzelmessungen, wurden die in Abbildung 2 dargestellten einfachen Beziehungen für den Stomatawiderstand r_{st} Mais unter den extrem ariden Bedingungen Saudi Arabiens gefunden (v. HOYNINGEN-HUENE, 1980). Deutlich zu erkennen ist das Öffnen der Poren (abnehmender Stomatawiderstand) bei zunehmender Einstrahlung, wobei bei hohen Werten der PAR eine gewisse Sättigung eintritt. Bei zunehmender Bodenfeuchte öffnen sich die Poren ebenfalls, da zur Aufrechterhaltung des Blatturgors vor allem eine ungehinderte Wasserversorgung aus den Boden notwendig ist. Besonders interessant ist die Abhängigkeit von der Temperatur. Sie zeigt ein Maximum der Porenöffnung zwischen 30 und 35 $^{\circ}C$, was etwa der Charakteristik der Photosynthesekurve für Mais in Abbildung 1 entspricht. Eine Windabhängigkeit konnte bei den beschriebenen Untersuchungen in Mais nicht gefunden werden, während der Einfluß der Luftfeuchte unter den extrem trockenen Bedingungen nicht eindeutig war. LÖSCH (1979) fand hier bei Labormessungen an Epidermisstreifen der Farnart (*Polypodium vulgare*) neben ähnlichen Beziehungen zur Lufttemperatur eine deutliche Abnahme der Stomataöffnung bei abnehmender Luftfeuchte.

3 Einfluß des Bestandes auf die mikrometeorologischen Bedingungen in der Blatumgebung

Die mikrometeorologischen Parameter im Bestand, welche die Produktions- und Transpirationsleistung der Einzelblätter beeinflussen, sind von den meteorologischen Bedingungen oberhalb des Bestandes abhängig, werden aber durch die optischen und geometrischen Eigenschaften der Bestandselemente modifiziert. Gleichzeitig sind die Pflanzen durch Transpiration und Energieumsetzungen selbst aktiv an der Ausbildung des Bestandsklimas beteiligt.

3.1 Strahlungsbedingungen

Wichtigster Parameter für Energiehaushalt der Blätter für Photosynthese und Transpiration ist die Strahlung. Beim Eindringen in den Bestand nimmt die Strahlungsstromdichte für die einzelnen Wellenlängen entsprechend dem Beerschen Gesetz näherungsweise entsprechend der Funktion

$$R_z = R_0 \cdot e^{-b\Sigma LAI(z)} \quad (1)$$

ab, wobei $\Sigma LAI(z)$ die von oben her aufsummierte Blattflä-

che (in Quadratmeter Blattfläche je Quadratmeter Bodenfläche) ist. Der Extinktionskoeffizient b ist von den Reflexions- und Transmissionseigenschaften der Einzelblätter und der anderen Pflanzenteile, ihrer Haltung gegenüber der Einstrahlungsrichtung sowie von der Wellenlänge abhängig und liegt im Sichtbaren um 0,7 (v. HOYNINGEN-HUENE, 1980, BRADEN, 1982). Bei den langwelligen Strahlungsströmen muß die Ausstrahlung der Pflanzenteile entsprechend ihrer Temperatur nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berücksichtigt werden. Der Emissionskoeffizient im langwelligen Bereich liegt bei den meisten Blättern nur knapp unter 1 (0,90—0,97).

3.2 Transportprozesse

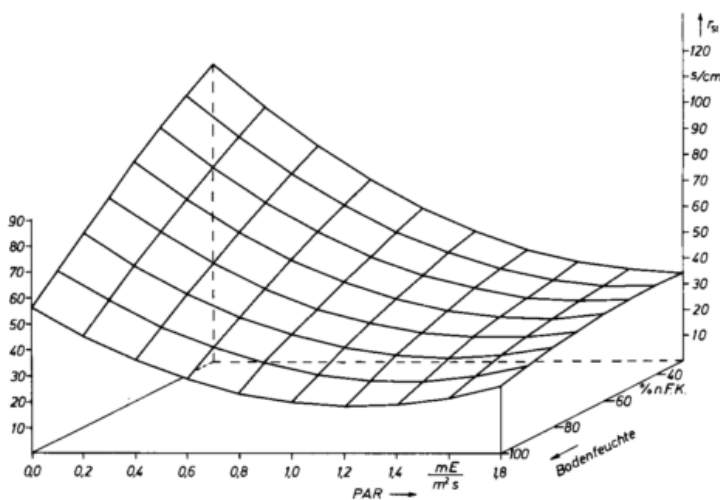
Die Transportprozesse für CO_2 , O_2 , Wasserdampf und Wärme, aber auch für beliebige Luftbeimengungen wie Pollen, Samen, Krankheitserreger etc. sind von sehr unterschiedlicher Natur: in den Blattporen und in der laminaren Grenzschicht um die Pflanzenteile herrscht molekulare Diffusion vor, im Bestandsinneren überwiegt erzwungene Konvektion und in den oberen Bestandsschichten und außerhalb kommt die freie Konvektion dazu, wobei das Turbulenzspektrum innerhalb des Bestandes und direkt darüber vor allem durch die Rauigkeitselemente des Bestandes geprägt wird. Der Transport kann als Flußdichte jeweils aus dem Quotienten aus der Differenz der Konzentration einer Eigenschaft und dem Transportwiderstand errechnet werden.

Dieser Widerstand r hat in den einzelnen Schichten bzw. Bereichen eine sehr unterschiedliche Größenordnung. Beispiele für den stomatären Widerstand r_{st} unter extrem ariden Bedingungen werden in Abbildung 2 gezeigt. Unter gemäßigten Bedingungen liegen die Widerstände allerdings meist eine Zehnerpotenz niedriger.

Die Bestimmung der Transportwiderstände in Blattnähe r_B in $s \cdot m^{-1}$ kann aus strömungstheoretischen Überlegungen aus Reynolds-, Prandtl- und Nußeltzahl abgeleitet werden zu

$$r_B = c_1 \cdot u^{-c_2} \cdot d^{c_3}, \quad (2)$$

wobei u die Windgeschwindigkeit in m/s und d die Blattbreite in m ist. Windkanaluntersuchungen und Messungen im Freiland ergaben als brauchbare Werte $c_1 = 93,2$ und $c_2 = c_3 = 0,5$ (GATES und PAPIAN, 1971).



Der Widerstand gegen den Strom latenter Verdunstungsenthalpie liegt wegen der geringen Molekülgröße von H_2O im Vergleich zu O_2 , CO_2 und N_2 um etwa 7—11% niedriger als für den Strom fühlbarer Wärme (MONTEITH, 1978).

Die mittleren (bulk) Widerstände r_{bu} für die vertikalen Transporte von Impuls, Wärme oder Luftbeimengungen sind um etwa 5 Zehnerpotenzen kleiner als die Grenzschichtwiderstände. Sie konnten bisher nur näherungsweise mit Hilfe stark vereinfachender Annahmen oder mit empirischen Beziehungen abgeschätzt werden. In neuerer Zeit wurde jedoch eine zuverlässigere Berechnung mit Hilfe einer Verallgemeinerung der Mischungsweglänge möglich, die sich nach PERRIER (1976) als Integral über die Wahrscheinlichkeit P dafür, daß man in einer Kugel mit dem Radius r weder Pflanzenteile noch den Boden antrifft, bestimmen läßt. Dann gilt

$$l(z) = k \int_0^{\infty} P(z,r) dr, \quad (3)$$

wobei k die v. Kármánsche Konstante ist. Die so berechnete Mischungsweglänge l wächst, wie Abbildung 3 zeigt, nach einem linearen Anstieg in Bodennähe wegen der zunehmenden Blattflächendichte im Bestandsinneren nur in deutlich geringerem Maße um außerhalb entsprechend dem v. Kármánschen Ansatz

$$l(z) = k(z - d) \quad (4)$$

wieder linear mit der Höhe z zuzunehmen (d bedeutet hier die Verdrängungshöhe).

Mit der Berechnung der turbulenten Diffusionskoeffizienten K nach dem Mischungswegansatz

$$K(z) = l^2(z) \frac{du}{dz} \quad (5)$$

führen die Gleichungen für den turbulenten Impulstransport

$$\tau(z) = K_M(z) \rho \frac{du}{dz} \quad (6)$$

und für die an die Pflanzenteile abgegebenen Schubspannungen

$$\frac{d\tau}{dz} = \rho c_M(z) u^2(z) \quad (7)$$

auf eine Differentialgleichung, welche numerisch gelöst werden kann. Hier ist τ die Impulsstromdichte, ρ die Luftdichte und c_M Dichte des effektiven Schubkoeffizienten. Dabei erge-

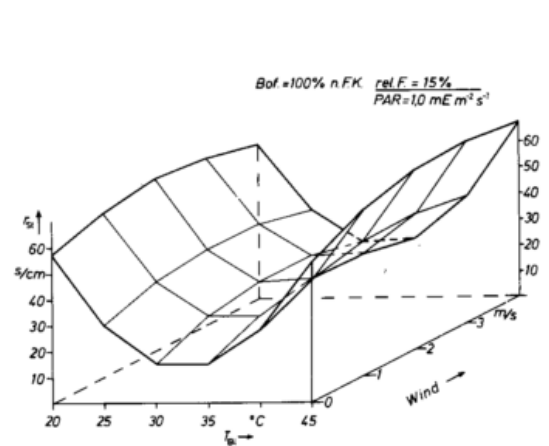


Abb. 2: Regressionsfläche des Stomatawiderstandes von Maisblättern gegenüber photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) und Bodenfeuchte sowie Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur unter extrem ariden Bedingungen.

wie Abbildung 7 zeigt. Die dort als Summe der Verdunstungswerte der Blattflächen in den einzelnen Schichten ermittelten Verdunstungsraten des Gesamtbestandes wichen nur um 5–10% von den Meßwerten ab.

Abbildung 8 zeigt Beispiele, errechnet mit dem Simulationsmodell von BRADEN (1982) für einen Maisbestand unter den meteorologischen Bedingungen des 28. und 30. Juli 1978 in Braunschweig.

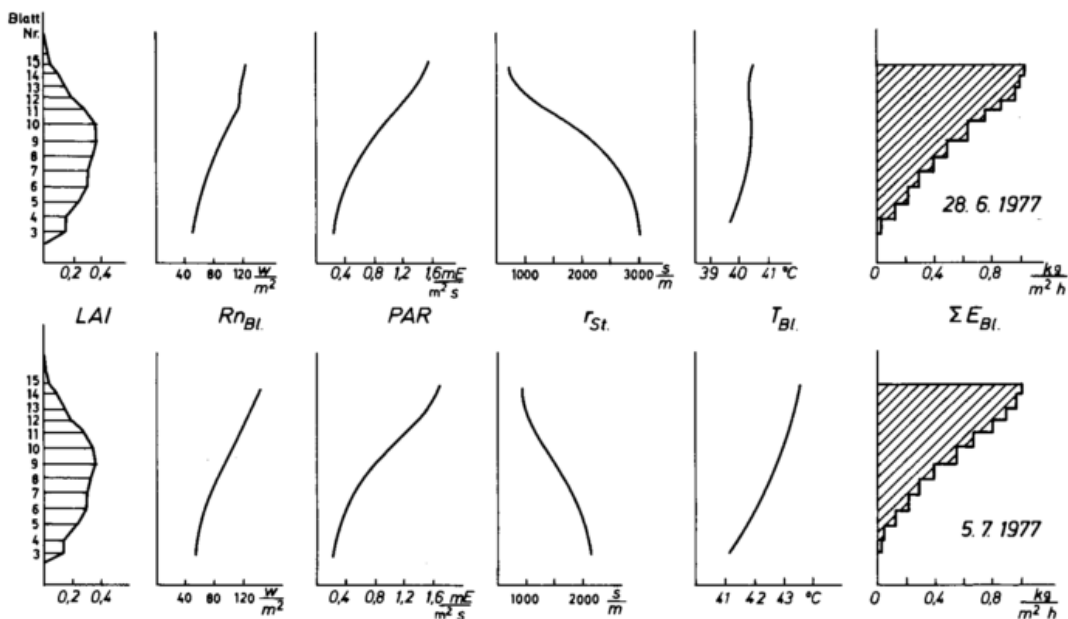


Abb. 7: Vertikalprofil bestandsklimatischer Parameter und der Transpiration nach Modellrechnung, 5. Juli 1977.

4.2 Produktionsleistung in den Bestandsschichten

Da die ökologischen Bedingungen der Blätter eines Pflanzenbestandes und die Transpiration mit Hilfe mikrometeorologischer Modelle recht genau berechnet werden können, kann man auch die Produktionsleistung in Abhängigkeit von den äußeren meteorologischen Bedingungen und den physiologischen und bestandsgeometrischen Parametern für jedes Einzelblatt ermitteln, wenn die spezifische Photosynthese dieser Pflanzen als Funktion der meteorologischen Bedingungen bekannt ist.

Bei geringem Bodenwassergehalt ist die Transpiration vom späten Vormittag an gegenüber den Verhältnissen bei höherer Bodenfeuchte deutlich reduziert. In den Mittagsstunden beträgt der Unterschied etwa 20%. Die Reduktion der Photosynthese setzt zwar etwa zur gleichen Zeit ein, wirkt sich aber in den Mittagsstunden deutlich schärfer aus. Die Ergebnisse aus diesen Modellrechnungen legen den Schluß nahe, daß die sinkende Produktionsleistung der Pflanzen bei Wassermangel vor allem durch die Blockierung des CO₂-Gaswechsels aufgrund der reduzierten Stomataweite verursacht wird und weniger auf den eingeschränkten Nährlösungstransport aus dem Boden durch reduzierte Transpiration oder durch Überhitzungseffekte in den Blättern zurückzuführen ist.

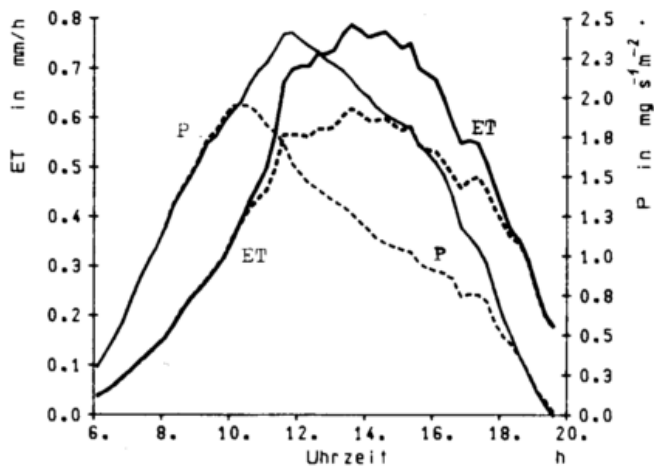


Abb. 8: Tagesgang von Photosyntheseleistung P und Transpiration ET eines Maisbestandes bei guter (—) und schlechter Wasserversorgung nach Modellrechnung für einen ungestörten Sommertag (BRADEN, 1982).

5 Schlußfolgerungen

Die Bedeutung der Wirkung mikrometeorologischer Vorgänge auf die pflanzliche Produktion ist quantitativ seit je bekannt. In den vergangenen Jahrhunderten wurde bereits versucht, durch Veränderung des Mikroklimas, z.B. durch Windschutz, Bestandsdichteänderungen, Beschattung etc. die Produktivität der Nutzpflanzen zu steigern. Der Erfolg solcher Versuche war jedoch begrenzt, und die Ergebnisse erschienen oft recht widersprüchlich, da die tatsächlichen Zusammenhänge weitgehend unbekannt waren und Wechselwirkungen mit anderen Parametern oft nicht überblickt werden konnten. Es waren jahrzehntelange Experimente notwendig, um optimale Saatstärken, Windschutzanordnungen etc. zu finden.

Aufgrund der Fortschritte in der forst- und agrarmeteorologischen Forschung, insbesondere aber durch neue Erkenntnisse über biophysikalische Wechselwirkungen und durch Erarbei-

tung agrarmeteorologischer Kausalmodelle ist es nun aber möglich geworden, die Wirkung von pflanzenbaulichen und züchterischen Maßnahmen auf die Produktionsleistung, sowie ökologischen Folgewirkungen zu berechnen oder abzuschätzen und zwar für eine Vielzahl von angenommenen äußeren meteorologischen Bedingungen. Zweifellos lassen sich diese Modelle z. B. durch Aufnahme zusätzlicher Einflußkomponenten noch verbessern. Auch Vereinfachungen durch die Wahl größerer Zeitschritte oder durch Vernachlässigung unwichtiger Details sind möglich. Für die zukünftige biometeorologische Forschung sind jedoch vor allem Fortschritte in der Parametrisierung solcher Modelle notwendig. Es fehlt z. Z. noch am Grundlagenwissen über manche Einzelprozesse im Wirkungsbereich Mikrometeorologie — Physiologie, insbesondere über die Abhängigkeit der Photosyntheseleistung vieler Pflanzenarten von meteorologischen Bedingungen und physiologischer Vorgeschichte und über die Gesetzmäßigkeiten beim Assimilattransport in die reproduktiven Organe der Pflanzen. Ein Grund für die oft beträchtlichen Wissenslücken ist die frühere enge Eingrenzung der Fachdisziplinen, welche sich entweder auf die Erforschung meteorologisch-physikalischer oder auf physiologisch-chemischer Prozesse konzentrierten. Durch die Verstärkung der interdisziplinären Arbeitsweise, durch Erlernen biologischer Prinzipien durch Meteorologen bzw. physikalischer Denkweisen durch Biologen sind in Zukunft größere Fortschritte in den biophysikalischen Wissenschaften zu erwarten.

Literatur

BRADEN, H.: Simulationsmodell für den Wasser-, Energie- und Stoffhaushalt in Pflanzenbeständen. Dissertation, Techn. Universität Braunschweig, 1982.

- GATES, D. M., PAPIAN, L. E.: Atlas of energy budgets of plant leaves. London, New York: Acad. Press, 1971.
- v. HOYNINGEN-HUENE, J.: Pflanzen als Mittler im Verdunstungsvorgang. *Promet* 5 (1975) H. 1, S. 11—17.
- v. HOYNINGEN-HUENE, J.: Mikrometeorologische Untersuchungen zur Evapotranspiration von bewässerten Pflanzenbeständen. *Ber. d. Inst. f. Meteorol. u. Klimatol. d. Univ. Hannover* Nr. 19 (1980).
- v. HOYNINGEN-HUENE, J., BRAMM, A.: Zur Bedeutung der Assimilationsmechanismen für den Energie- und Wasserhaushalt von Kulturpflanzen. *Meteorol. Rdsch.* 34 (1981) S. 167—178.
- LÖSCH, R.: Responses of stomata to environmental factors — Experiments with isolated strips of *Polypodium vulgare*. — *Öcologia* (Berl.) 39 (1979) S. 229—238.
- MATSUDA, M., BAUMGARTNER, A.: Ökosystematische Simulation des Nutzeffektes der Sonnenenergie für Wälder. *Forstwiss. Centralbl.* 94 (1975) H. 2—3, S. 89—104.
- MONTEITH, J. L.: Grundzüge der Umweltphysik. Darmstadt: Dr. Steinkopff Verlag, 1978.
- PERRIER, A.: Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux: profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette. *Diss. Inst. Nat. Recherche Agronomique, Paris* (1976).
- TRANQUILLINI, W.: Die Bedeutung des Lichtes und der Temperatur für die Kohlensäureassimilation von *Pinus Cembra*-Jungwuchs an einem hochalpinen Standort. *Planta* 46 (1955) S. 154—178.
- de WIT, C. T. et al.: Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Wageningen: Pudoc (1978).

H. FRIESLAND, Braunschweig

4 Die Rolle der Biometeorologie im integrierten Pflanzenschutz

1 Einleitung

Die zunehmende Industrialisierung der Landwirtschaft und der durch die Kostensteigerung auf dem Energie- und Rohstoffsektor verstärkte Zwang zur Rationalisierung des landwirtschaftlichen Produktionsprozesses werden von einem steigenden Verbrauch chemischer Pflanzenschutzmittel begleitet. Dabei besteht zwischen Ernteertrag und dem Aufwand an Pflanzenschutzmitteln ein relativ enger Zusammenhang. Wenn den Pflanzenschutzmaßnahmen bei der Steigerung der Produktivität und Rentabilität auch große Bedeutung zukommt, so darf chemischer Pflanzenschutz jedoch nicht zu einer direkten oder potentiellen Gefährdung des Menschen und des Agro-Ökosystems führen. Es bestehen wenig Zweifel daran, daß die Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung ohne maß- und sinnvollen chemischen Pflanzenschutz nicht mehr sichergestellt werden kann. Noch immer gehen weltweit rund 30% der möglichen Erträge durch Schadorganismen verloren. Wenn heute auf die Verwendung chemischer Pflanzen-

schutzmittel (ohne Ersatzmaßnahmen) verzichtet würde, träten nach groben Schätzungen Ertragsverluste um 50 bis 70% ein.

2 Integrierter Pflanzenschutz

Pflanzenschutz allgemein bezieht sich auf die Abwehr von Bedrohungen durch Schädlinge, Krankheiten und Unkräuter in Land- und Forstwirtschaft, Obst- und Gartenbau. Dabei müssen alle Anstrengungen unternommen werden, den Einsatz chemischer Mittel unter weitestgehender Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes zu steuern. Ein sich zunehmend durchsetzendes Konzept dazu stellt der integrierte Pflanzenschutz dar. Bereits 1959 wird er von STERN et al. (für Schädlinge) definiert als „applied pest control which combines and integrates biological and chemical control“ (S. 86). In Anlehnung an DIERCKS (1980) wendet der integrierte Pflanzenschutz direkte und indirekte physikalische, biologische und chemische Maßnahmen gegen Schadorganismen an,

unter vorrangiger Ausnutzung natürlicher Begrenzungsfaktoren und mit Hinsicht auf wirtschaftliche, ökologische und toxikologische Vertretbarkeit. Integrierter Pflanzenschutz beginnt bereits bei der Minimalmaßnahme, z. B. nur selektive (nützlingsschonende) Pestizide anstatt solcher mit Breitenwirkung zu verwenden, da sonst auch die natürlichen Feinde der Schädlinge von der Pestizidwirkung getroffen werden und sich meist langsamer erholen, so daß die nächste oder übernächste Schädlingspopulation wieder explosionsartig ansteigen kann. In einigen Fällen ist es möglich, gegen Schädlinge natürliche Feinde (Insekten, Pilze, Bakterien) einzusetzen. Auch bei Pflanzenkrankheiten (Pilze, Viren, Bakterien) sind Vorbeuge- und Bekämpfungsmaßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes entwickelt worden. Die Biometeorologie ist bei folgenden Techniken oder Maßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes (IPS) gefordert (Tab. 1).

Kenntnis der wirtschaftlichen Schadensschwelle dar: diese Schwelle soll gerade durch Maßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes angehoben werden und ist nach FRANZ (1978) ohnehin viel höher anzusetzen, da außer den internen (Behandlungs-)Kosten auch die externen oder Sozialkosten (Energie-, Abwasser-, Abdriftprobleme, Biotopschäden, Rückstandswirkungen usw.) berücksichtigt werden müssen. Sie ist diejenige Dichte an Schaderregern, bei der die Schäden die Kosten für eine Bekämpfung zu überschreiten beginnen. Diese Schadensschwelle (z.B. bestimmter Prozentsatz erkrankter Pflanzen oder Anzahl Schädlinge pro Pflanze) hängt aber nicht nur von vorgegebenen Bedingungen wie Standort, Sorte, pflanzenbauliche Intensität, Erzeugerpreis, Behandlungskosten und ähnlichen Faktoren ab, sondern auch vom Pflanzenzustand und von der Witterung in ihrer Wirkung auf das epidemische Geschehen. Ohne Frage kommt daher der

Tab. 1: Kooperationsbereiche zwischen IPS und Meteorologie

Maßnahmen des IPS:	meteorologische Mitarbeit:
1. Anwendung geeigneter chemischer oder biologischer Mittel nur ab Erreichen der Bekämpfungsschwelle für den jeweiligen Schadorganismus	Prognose der Bekämpfungs- und Schadensschwelle auf biometeorologischer Grundlage: Beratung für die Ausbringung der Mittel (günstigster Zeitpunkt) (statist. Modelle, Simulationsmodelle, Wettervorhersage)
2. Wahl optimaler Anbaumethoden, Aussaatzeiten und Bearbeitungstechniken (Kulturverfahren)	Prognose und Beratung bei der Veränderung des Mikro-(Bestands-)klimas (z.B. Windschutzhecken, Bewässerung usw.), Prognose der phänolog. Bestandsentwicklung (Gutachten, Simulationsmodelle, Wettervorhersage)
3. Züchtung und Anbau krankheits- oder schädlingsresistenter Pflanzensorten	Beurteilung der neuen Sorte durch ein Wetterertragsmodell (statist. Modelle, Simulationsmodelle)
4. Einsatz natürlicher Feinde oder verdrängender Arten gegen Schädlinge	Prognose der Populationsentwicklung des Schaderregers und dessen Gegenspieler, Beurteilung der Effektivität im neuen Ökotope auf biometeorologischer Grundlage. (Simulationsmodelle)

3 Agrarmeteorologische Vorhersagen im integrierten Pflanzenschutz

Im folgenden soll vor allem die Vorhersagemodellentwicklung unter Punkt 1 aus Tabelle 1 betrachtet werden, da auf diesem Gebiet bereits Fortschritte bestehen, während die agrarmeteorologische Forschung zu den Punkten 2 bis 4 zur Zeit erst die Grundlagen erarbeitet (siehe Abschn. 3.3).

3.1 Schwellenwerte in Befallsverläufen

Wichtigste Voraussetzung für den gezielten, wirtschaftlichen und minimalen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln stellt die

Epidemie- oder Gradationsprognose unter Berücksichtigung meteorologischer Einflußkomponenten eine ganz besondere Bedeutung zu. Der Begriff Gradation bedeutet eine rasche Massenvermehrung von Schädlingen. Der wichtigste vorherzusagende Befallswert bzw. Termin ist jedoch die *Bekämpfungsschwelle*, die wenige Tage vor der eigentlichen Schadensschwelle erreicht wird, da noch ein gewisser Verzögerungszeitraum für Erstellung und Übermittlung der Warnung oder Bekämpfungsempfehlung sowie für die Reaktionszeit des landwirtschaftlichen Betriebes anzusetzen ist. Bei sich schnell entwickelnden (vermehrten) Krankheiten (Schädlingen) spielt der Termin des Erstbefalls (z. B. Kartoffelkrautfäule) die entscheidende Rolle.

3.2 Prognoseverfahren der letzten Jahrzehnte

Die starke Abhängigkeit zahlreicher Pflanzenkrankheiten und Schädlingspopulationen von der Witterung hat von jeher zu dem Versuch angeregt, Kenntnisse von dieser Abhängigkeit zur Entwicklung von Epidemieprognosen zu benutzen. In jedem zu betrachtenden und eventuell zu simulierenden Ökosystem darf möglichst keine Wechselwirkung im Wirkungsdreieck Umwelt (Wetter!) — Wirtspflanze — Erreger unberücksichtigt bleiben (BOURKE, 1968). Abbildung 1 zeigt schematisch die auftretenden Beziehungen, die manchmal schwer erkennbar, kaum quantifizierbar und nur unzureichend biophysikalisch erklärbar sind.

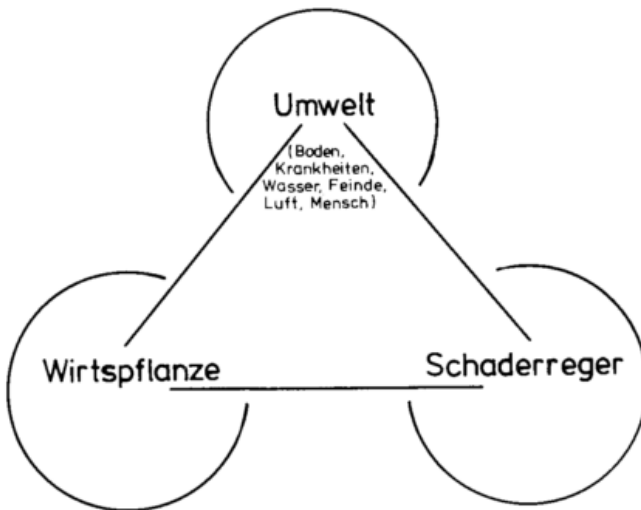


Abb. 1: Wirkungsdreieck (nach BOURKE, 1968)

Überblickt man die Prognoseentwicklung während der letzten Jahrzehnte, so lassen sich die bisher erarbeiteten Methoden in *drei historisch aufeinanderfolgenden Gruppen* klassifizieren, wenn man die jeweils verschiedenen berücksichtigten Anteile an Wetter-, Erreger- und Wirtsdaten einander gegenüberstellt. Eine ausführliche Darstellung der verschiedenen Methoden und Möglichkeiten wird z.B. von KRAUSE und MASSIE (1975) gegeben.

Zur *ersten Kategorie* können alle Prognoseverfahren gezählt werden, die nur auf der Verwendung meteorologischer Daten basieren. Insbesondere gehören hierzu Methoden, in denen versucht wird, das Auftreten einer Epidemie mit der Großwetterlage in Beziehung zu setzen, um mit der kurz- und mittelfristigen Wettervorhersage zugleich eine Prognose der epidemiologischen Entwicklung zu gewinnen. Der Grundgedanke steckt in der Annahme, daß für den Fortschritt einer Epidemie bzw. Gradation eine bestimmte Konstellation meteorologischer Einflußgrößen maßgebend ist und daß diese Konstellation an bestimmte Großwetterlagen gebunden ist. GULLACH und WALLIN (1970) fanden z. B. bestimmte Wetterlagen mit Abfolgen kurzer Wellen im 500 mbar-Niveau, die am Boden für die Entwicklung der Blattfleckenkrankheit an Zuckerrüben günstige Temperatur-Feuchtigkeitskombinationen ergeben. Damit konnten sie in diesem Fall eine Kennzeichnung von gefährlichen und ungefährlichen Wetterlagen vornehmen. Die Hoffnung, hier mit einer Verbesserung der mittel- und langfristigen Witterungsprognosen auch zu einer

besseren Epidemievorhersage zu kommen, hat sich jedoch noch nicht erfüllt. Das Problem liegt darin, daß gerade eine Pflanzenkrankheit Folge einer mehr oder weniger langen Entwicklung ist und nicht plötzlich auftaucht. Bestimmte, wetterlagenbedingte meteorologische Konstellationen allein können keine Epidemie bzw. Gradation auslösen. Es ist vielmehr der zeitliche Ablauf des Zusammenwirkens aller möglichen (im obigen Wirkungsdreieck enthaltenen) Umwelt- und Pflanzenparameter, der darüber entscheidet, ob und wann es zu einer Epidemie bzw. Gradation kommt.

Ein Beispiel für einen Epidemieverlauf bietet Abbildung 2 für Gerstenmehltau im Jahr 1975 (SCHIFF, pers. Mitteilung). Eine so frühe und starke Entwicklung dieser Pilzkrankheit tritt keineswegs häufig auf, sondern verläuft in meteorologisch „normalen“ Vegetationszeiten flacher und oft unstetig. Neben dem Witterungsverlauf ist aber auch das Vorhandensein einer genügenden Sporenmenge zur Infektion mit entscheidend.

Aus der fortlaufenden Beobachtung der meteorologischen Entwicklung und aus der Kenntnis dieser Einflüsse auf die Pflanzen- und Erregerentwicklung sind Schlüsse auf den wahrscheinlichen epidemiologischen Fortgang schon zu einer Zeit zu ziehen, wo sich z. B. eine Pflanzenkrankheit noch der direkten Beobachtung entzieht. Aus dieser Erkenntnis heraus sind Verfahren entwickelt worden, welche die in jeder Prognose steckende Unsicherheit dadurch zu umgehen versuchen, daß nicht der Beginn einer Epidemie (Gradation) vorhergesagt wird. Es wird vielmehr aufgrund fortlaufender meteorologischer Beobachtungen abgeschätzt, bis zu welchem Zeitpunkt z. B. ein epidemisches Auftreten der Krankheit schon aus meteorologischen Gründen gar nicht möglich ist. Wohl als erster ging WALLIN (1962) in dieser Weise vor. Unabhängig davon entwickelten dann SCHRÖDTER und ULLRICH (1967) mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse ein komplexeres Modell auf der Grundlage der Theorie Vanderplanks, das als „Negativ-Prognose“ international Eingang gefunden hat. Dieses Verfahren zur Vorhersage der Kartoffelkrautfäule kann als Beispiel der *zweiten Kategorie* von Prognosemethoden dienen; hier wird nicht nur auf meteorologischen Parametern aufgebaut, sondern in gewissem Umfang bereits der Erreger-Wirt-Komplex einbezogen. Abbildung 3 soll typische Verläufe der Phytophthora darstellen. Dabei ist 1% Anteil an sichtbar befallenden Pflanzen als Epidemiebeginn definiert, der aber in manchen Jahren nicht erreicht wird. Es wird sichtbar, daß bei einem relativ hohen Frühbefall das Erreichen der Epidemieschwelle vor der Ernte fast schon vorbestimmt ist. Die guten Erfolge dieser Verfahren dürfen aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß eine entscheidende Voraussetzung für den praktischen Nutzen dieser Modelle darin liegt, daß sie sich nur auf Pflanzenkrankheiten mit niedrigem Initial-Inokulum (Anfangsinfektion bei Pilzen), hoher Erregervermehrungsrate und starker Witterungsabhängigkeit beziehen. Der Fortschritt gegenüber der ersten Kategorie liegt zweifellos darin, daß nicht nur eine bestimmte Wettersituation berücksichtigt wird, sondern daß diese komplexeren Modelle versuchen, die gesamte Dynamik des Wetters darzustellen. Ihr Mangel besteht jedoch darin, daß sie die vielfältigen Beziehungen zwischen Wirt, Parasit und Entwicklung nur in einem relativ einfachen statistischen Modellansatz zu berücksichtigen vermögen. Diese Modelle der zweiten Kategorie sind damit nicht in der Lage, tiefere Einsichten in die Vielfalt der Beziehungen im Wir-

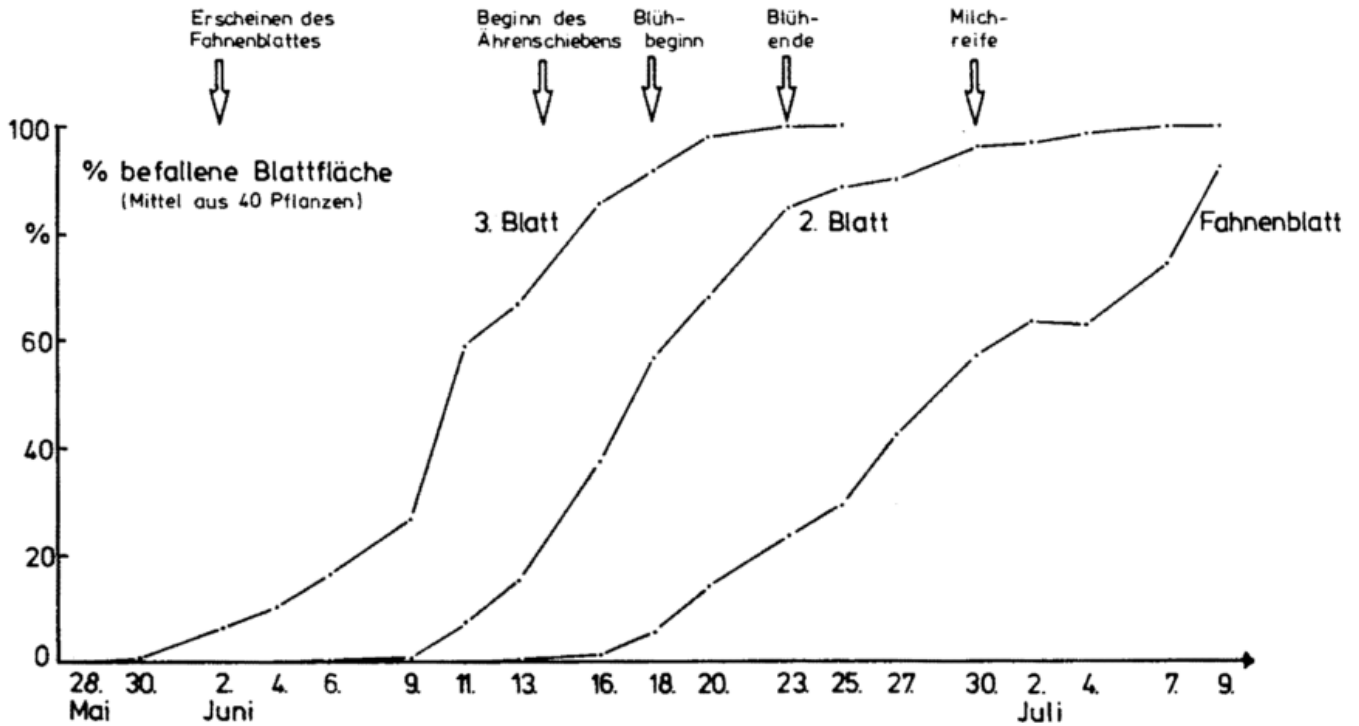


Abb. 2: Starke Mehltau-Epidemie in Sommergerste „Oriol“ (nach SCHIFF, 1975)

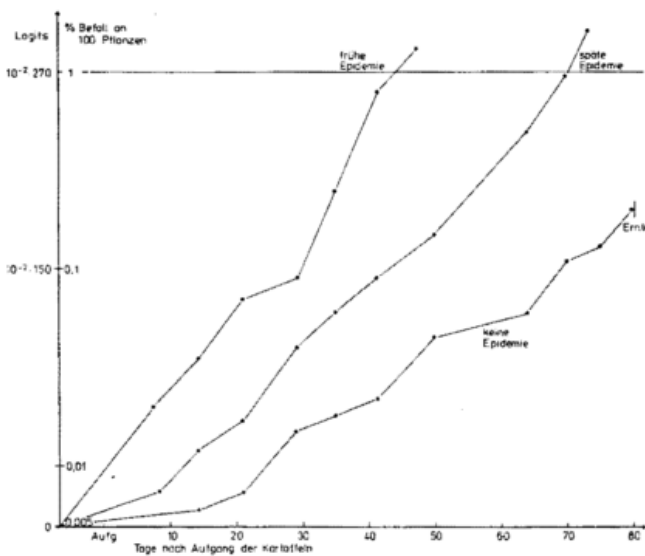


Abb. 3: Summenlinien des P. trichosporium-Befallverlaufs ($Y_E = \int_{t_A}^{t_E} f(p)dt + u$) nach Eingabe verschiedener meteorologischer Datensätze (nach SCHRÖDTER u. ULLRICH, 1967).

kungsdreieck in Abbildung 1 zu geben. Dies gilt insbesondere für die Vielzahl derjenigen Schadorganismen, die — wie z. B. der Gerstenmehltau — sehr flexibel auf die Umweltbedingungen reagieren. Das ist zweifellos einer der Gründe, warum immer noch ein außerordentliches Mißverhältnis zwischen der großen Anzahl der Pflanzenkrankheiten und Schädlinge einerseits und der Anzahl der in der Praxis verwendbaren Vorhersagemethoden andererseits besteht.

Hier bahnt sich seit den letzten 15 Jahren mit der Entwicklung der Systemanalyse und Simulationstechnik ein entscheidender Fortschritt an. Er liegt vor allem in der Erkenntnis der Bereiche Wirt — Parasit — Umwelt als ein aus miteinander verkettenen Teilsystemen bestehender Komplex. Es kommt dann darauf an, diesen in seinen Strukturen und Funktionen zu erfassen, zu analysieren und in einem geeigneten Modell abzubilden. Der Sinn der Modellierung liegt nicht nur in der Beschreibung von Untersuchungsergebnissen, deren Interpretation und Schlußfolgerungen. Vielmehr bieten Funktionsmodelle die Möglichkeit des Experimentierens, d. h. bestimmte epidemiologische Abläufe (bzw. Gradationsverläufe) unter vorzugebenden, z. B. meteorologischen Bedingungen, zu simulieren. Entsprechend der eingangs gegebenen Klassifizierung nach der Berücksichtigung meteorologischer und biologischer Daten ist mit den Simulationsmodellen nunmehr die *dritte Kategorie* von Analyse- und Vorhersagemethoden erreicht. Sie zeichnet sich durch das gleichgewichtige Nebeneinander von erregerspezifischen, wirtsspezifischen und (meteorologischen) Umwelt-Randbedingungen aus. Damit ist die Grundlage für die Entwicklung einer komparativen Epidemiologie geschaffen, die allein geeignet sein wird, die Zahl arbeitsfähiger Prognosemodelle zu erhöhen. Nach KRANZ (1980) kann zum Erreichen von Bekämpfungskonzepten für Pflanzenkrankheiten von der komparativen Epidemiologie eine Zuordnung erwartet werden, die die grenzenlose Vielfalt von Epidemien und die sie beeinflussenden Komponenten auf eine überschaubare Zahl von Grundtypen oder Basissystemen reduziert.

Nach SCHRÖDTER und AUST (1978) ist es durchaus möglich und erforderlich, Vorhersagesysteme auf der Basis von Simulatoren aufzubauen, da sie die immer wieder erhobene For-

derung nach stärkerer Berücksichtigung der mikrometeorologischen Bedingungen erfüllen. Eines der ersten Modelle dieser Art war EPIDEM von WAGGONER und HORSFALL (1969) zur Simulation von Alternaria (Blattfleckenkrankheit) an Tomaten. Heute hat die Systemanalyse und Modelltheorie die Voraussetzungen für die Entwicklung von Bindegliedern zwischen Pflanzenpathologie, Epidemiologie, Entomologie (Insektenkunde), Pflanzenphysiologie und Biometeorologie geschaffen. Die neueren Modelle setzen wie z.B. bei RIJS-KIJK (1980) nicht nur die epidemiologischen Parameter (bei Pilzkrankheiten) wie Latenzzeit, Infektionszeit, Sporulation zu den meteorologischen Parametern in Beziehung, sondern auch zur Entwicklung des Bestandes und der Physiologie der Pflanzen. Wesentliche Veränderungen der epidemiologischen Parameter während des Pflanzenwachstums müssen berücksichtigt werden. So sind z.B. Intensität der Sporenverbreitung, Altersresistenz gegen Parasiten, Vermehrungsrate von Schädlingen und Auswirkungen von Wasser- und Hitzestress während der Bestandsentwicklung Änderungen unterworfen. Auf der Grundlage von Simulatoren wird schließlich das neue Konzept der „Konditionalprognose“ entwickelt (HAU et al., 1981):

Eine Konditionalprognose soll angeben, welche Bedingungen eintreten müßten, um einen zur Zeit noch unbedenklichen epidemiologischen Zustand kritisch werden zu lassen und wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, im Vorhersagezeitraum die wirtschaftliche Schadensschwelle zu erreichen oder welche u. U. außergewöhnlichen Bedingungen eintreten müßten, um Bekämpfungsmaßnahmen auszulösen.

Hinsichtlich der Wetter-Faktoren ist eine Kopplung von Prognoseaussage mit der Wahrscheinlichkeit des Eintretens der außergewöhnlichen meteorologischen Bedingungen wichtig. Dazu müssen die für den Vorhersagezeitraum zu simulierenden Witterungsabläufe den Merkmalen verschiedener Wetterlagen unter Beachtung von Mittelfristprognosen und regionaler Differenzierung angepaßt werden. Dabei könnten Erkenntnisse aus den Vorhersageverfahren der ersten Kategorie in einem etwas anderen Sinn als ursprünglich nutzbar gemacht werden.

RABBINGE und VEREIJKEN (1980) entwickelten ein Simulationsmodell für das Wachstum von Weizen und die Populationsentwicklung von Getreideblattläusen im Bestand. Es basiert auf mathematisch-biophysikalischen Gleichungen für die Assimilation, Atmung und Transpiration an der Bestandsobergrenze einerseits und berechnet daraus die Trockenmasseproduktion des Weizens und andererseits auf Gleichungen für Ein- und Auswanderungen, Lebensdauer, Fruchtbarkeit der Blattläuse sowie Auswirkungen ihrer natürlichen Feinde, jeweils in Abhängigkeit vom Pflanzenwachstum. Das Modell kann u. a. die Populationsdichte der Blattläuse simulieren und Ertragsverluste vorhersagen. Eine gute Übereinstimmung von Modellergebnis und Beobachtung zeigt Abbildung 4 für ein starkes Blattlausauftreten in Winterweizen.

Abbildung 5 verdeutlicht schematisch die drei Kategorien mit ihren Anteilen an Umwelt- sowie Pflanzen- und Erregerdaten. Dabei verlief die Modellentwicklung historisch mit teils fließenden, teils sprunghaften Übergängen vom Regressionsmodell (als empirische, beschreibende, funktionale (statistische) Zusammenhänge herstellende „black box“) bis zum Simulationsmodell (als experimentelle, erklärende, kausale Zusammenhänge herstellende „white box“).

Fast immer wird aber ein gewisser Restanteil empirischer, funktionaler Zusammenhänge verbleiben, da nicht alle biologischen, chemischen und physikalischen Vorgänge kausal und erklärend faßbar sind, so daß sich meist ein gemischtes Modell („grey box“) ergibt (OBST, 1979).

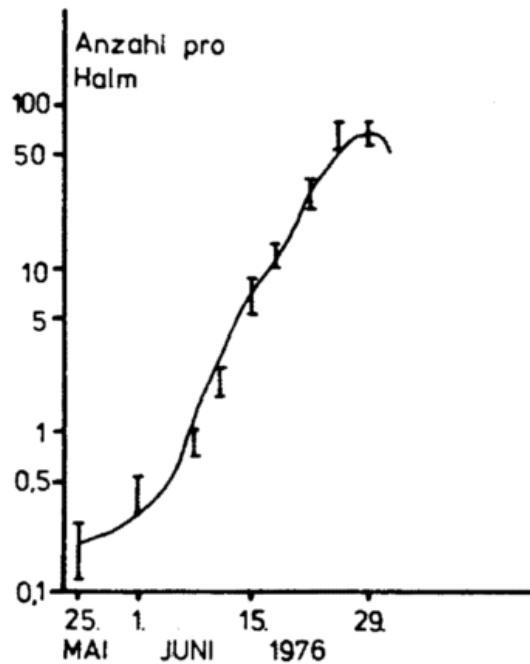


Abb. 4: Simulierte (Kurve) und gezählte (mit 95% Konfidenzintervall) Anzahl der Großen Getreideblattlaus 1976 bis zum Populationsmaximum (nach RABBINGE u. VEREIJKEN, 1980).

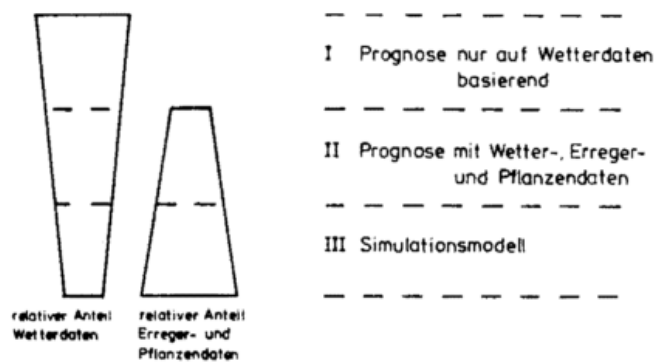


Abb. 5: Schema der 3 Kategorien von Vorhersagemethoden für Pflanzenkrankheiten und Schädlinge (nach SCHRÖDTER u. AUST, 1979).

3.3 Nutzung von Modellen des Bestandsklimas und von Wachstums- und Wetterertragsmodellen

Es gibt bereits für den integrierten Pflanzenschutz nutzbare Ansätze in der Agrarmeteorologie, die sich auf die Punkte 2 und 3 in Tabelle 1 beziehen. Mathematisch-statistische und Simulationsmodelle werden zur Berechnung des Bestandsklimas entwickelt und angewandt, dessen meteorologische Parameter

je nach Pflanzenart oft erheblich von denen auf dem Klima-
meßfeld gewonnenen abweichen. Dabei liegt z. B. die Tempe-
raturdifferenz je nach Bestandsniveau, Wetterlage und Tages-
zeit durchaus mal im Positiven, mal im Negativen. Die Pflan-
zendichte und -höhe sowie physiologische Eigenschaften (Sto-
mataöffnungsweite) beeinflussen auch stark die relative
Feuchte unterhalb der Bestandsoberfläche und damit speziell
die Entwicklung von Pilzkrankheiten. Es ist anzustreben, einen
Pflanzenbestand weder in einen meteorologisch begrün-
deten Streß gelangen zu lassen (begünstigt Schwächeparasi-
ten), noch die meteorologischen Voraussetzungen für Schad-
organismen zu schaffen. Dazu reicht eine Modellierung des
Mikroklimas mit den üblichen meteorologischen Größen
nicht aus. Um die pflanzenphysiologischen Vorgänge genauer
und besser erfassen zu können, untersuchten z. B. GOU-
DRIAAN (1977) und DE WIT et al. (1978) modellhaft Ener-
gieströme und -umsetzungen in bzw. unter dem Bestand, also
auch den Bodenwasserhaushalt. Wesentliche Größen stellen
dabei dar: Blattflächenindex, Stomatawiderstand, photosyn-
thetisch aktive Strahlung (PAR) und Photosyntheseleistung,
Evapotranspiration, Respiration, Austausch von Wärme,
Wasserdampf und Impuls. Ein Simulator der energetischen
Vorgänge in verschiedenen Bestandsschichten, besonders mit
einer verbesserten Berechnung der Strahlungsverteilung, wird
von BRADEN (1982) vorgestellt. Bei einer geplanten physika-
lisch-biologischen Änderung des Bestandes aufgrund des pro-
phylaktischen Pflanzenschutzes sind entsprechende Modell-
rechnungen durchzuführen, um die Reaktion der Pflanze wie
auch des Schaderregers auf die veränderten Umweltbedingun-
gen abzuschätzen.

Es existieren für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen
bereits sogenannte Wetterertragsmodelle, die nach Eingabe
meteorologischer Daten und wichtiger biologischer Randbe-
dingungen den Ernteertrag z. B. in Gewicht Trockenmasse,
Tausendkorngewicht oder in Geldwert berechnen. Ein Bei-
spiel aus dem kanadischen Weizenbau stellt das empirische,
mathematisch-statistische Modell von BAIER und WIL-
LIAMS (1974) dar. Sie benutzten im wesentlichen Regres-
sionsgleichungen unter Einbeziehung von Temperatur, Nie-
derschlag, Verdunstung und Sonnenscheindauer. IDSO et al.
(1980) entwickelten ein generelleres Konzept zur Ertragspro-
gnose von weiteren Kulturen außer Getreide. Sie berechneten
dazu die Strahlungseinnahme des Bestandes während der ve-
getativen Wachstumsphase und sogen. „Streßgradtage“
(Temperaturdifferenz Bestand — Luft um 14 Uhr) während
der reproduktiven Wachstumsphase (etwa ab Blühbeginn).
Sollte z. B. zur Vermeidung des Auftretens von Schaderregern
der Aussaat- und Erntetermin vorverlegt oder hinausgescho-
ben werden, dann kann ein Ertragsmodell für typische Witte-
rungsverläufe durchspielen, ob eine solche Maßnahme ökolo-
gisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, ob also der vermutliche
Minderertrag durch sonst eintretende Schaderregerverluste
oder Bekämpfungskosten noch überstiegen wird.

Mit den Ertragsmodellen sind Vorhersagemodelle für die phä-
nologische Bestandsentwicklung eng verbunden. Einfache,
grobe Zusammenhänge zwischen Umweltbedingungen und
Pflanzenwachstum wurden schon lange mittels Gradtagen
(tägliche Temperatursumme über bestimmten Schwellen-
werten) aufgestellt. Ein verfeinertes empirisch-statistisches
Modell entwickelte ROBERTSON (1973) mit differenziertem
Einfluß von Temperatur und Photoperiode während der un-

terschiedlichen Entwicklungsstadien bei Getreide („biometeo-
rological time scale“). Diese Skala berücksichtigt die unter-
schiedliche Wichtung von Temperatur und Licht während der
Wachstumsphasen. Ähnliche, besser noch Simulationsmodelle
zur Vorhersage der phänologischen Phasen werden drin-
gend zur Verwirklichung des Konzeptes des integrierten
Pflanzenschutzes gebraucht.

4 Ausblick

Ein Großteil der Bestandteile des integrierten Pflanzenschutzes
in Tabelle 1, sowohl die physikalischen und chemischen,
als auch die biologischen Maßnahmen haben weiterhin gute
Anwendungs- bzw. Entwicklungschancen. Ein großer Nach-
holbedarf und damit auch erhöhte Zukunftsaussichten beste-
hen sicher auf dem physikalischen und biologischen Sektor.
Dort liegen auch die weitesten Betätigungsfelder für die Mit-
arbeit von Meteorologen. WILBERT (1977) sieht Schwierig-
keiten bei einer breiteren Akzeptanz des integrierten Pflan-
zenschutzes, da an Land- und Forstwirte, Gartenbau und an
die Beratung hohe Ausbildungsansprüche gestellt werden. Ein
Denken in Systemen muß verlangt werden, also eine ganzheit-
liche Betrachtungsweise der Ökosysteme durch Aufklärung
bzw. Erkennen des biologisch-chemisch-physikalischen Zu-
sammenwirkens. Je mehr die Vorteile des integrierten Pflan-
zenschutzes zu Buche schlagen, umso mehr wird sich dieses
Konzept durchsetzen. Erreichbare Vorteile liegen in einer
geringeren Belastung oder Schädigung der Umwelt durch bes-
seres Ausnutzen natürlicher Regulationsfähigkeiten, Kosten-
senkung, Ertragserhöhung, Verhinderung von Epidemien und
Vermeidung von Resistenzen. Von der Mitarbeit der Agrar-
meteorologie werden dabei Ergebnisse in Form von meteorolo-
gisch fundierten Prognosemodellen für Pflanzenkrankheiten
und -schädlinge, Bestandsklima und Ertrag dringend er-
wartet, während Verbesserung und Erweiterung der Mittel-
fristprognosen diejenige Forderung ist, welche die Agrarmeteo-
rologie in diesem Zusammenhang an die Synoptik stellen
muß.

Literatur

- BAIER, W.; WILLIAMS, G. D.: Regional wheat yield pre-
dictions from weather data in Canada. Proc. of WMO-
Sympos. 22.—27.10.1973, WMO-No. 396, Offenbach
1974, S. 265—283.
- BRADEN, H.: Simulationsmodell für den Wasser-, Energie-
und Stoffhaushalt von Pflanzenbeständen. Landbaufor-
schung Völknerode 32 (1982) (in Vorbereitung).
- BOURKE, P. M. A.: Some principles and methods in plant
disease forecasting. Proc. Regional Training Seminar on
Agrometeorology, 13.—25.05.1968, Wageningen/NL.,
Agric. Univ. Wageningen (1968), S. 17—33.
- DIERCKS, R.: Statusbericht Pflanzenschutz. Landwirtschaft
— Angewandte Wissenschaft, Reihe A, H. 244 (1980).
- FRANZ, J. M.: Das Konzept des Integrierten Pflanzenschut-
zes. Gesunde Pflanzen 30 (1978) S. 177—181.
- GOUDRIAAN, J.: Crop micrometeorology: a simulation
study. PUDOC, Wageningen/NL 1977.

- GULLACH, C. B.; WALLIN, J. R.: A suggested relationship between sugar beet leaf spot and upper-flow patterns. *Int. J. Biometeorology* 14 (1970) S. 349—335.
- HANUSS, K.: Integrierter Pflanzenschutz — Utopie oder Realität? *Z. f. Pflanzenkrankheiten u. Pflanzenschutz* 88 (1981) S. 705—725.
- HAU, B.; KRANZ, J.; SCHRÖDTER, H.: Zum Konzept der Konditionalprognose. Vortrag Pflanzenschutz-Tagung 05.—09. 10. 1981 Hamburg.
- IDSO, S. B. et al.: A generalization of the Stress-degree-day concept of yield prediction to accomodate a diversity of crops. *Agric. Meteorol.* 21 (1980) S. 205—211.
- KRANZ, J.: Comparative epidemiology: an evaluation of scope, concepts and methods. In: J. PALTU u. J. KRANZ (Ed.): *Comparative epidemiology*. Wageningen/NL: PUDOC 1980, S. 18—28.
- KRAUSE, R. A.; MASSIE, L. B.: Predictive systems: modern approaches to disease control. *Ann. Rev. Phytopathology* 13 (1975) S. 31—47.
- OBST, A.: Mathematische Modelle zum Beschreiben von Krankheits- und Schädlingsepidemien. *Gesunde Pflanzen* 31 (1979) S. 128—184.
- RABBINGE, R.; VEREIJKEN, P. H.: Die Wirkung von Krankheiten oder Schädlingen auf den Wirt. *Zeitschr. f. Pflanzenkrankh. u. Pflanzenschutz* 87 (1980) S. 409—422.
- RIJSDIJK, F. H.: Systems analysis at the cross-road of plant pathology and crop physiology. *Z. Pflanzenkrankh. u. Pflanzenschutz* 87 (1980) S. 404—408.
- ROBERTSON, G. F.: Development of simplified agroclimatic procedures for assessing temperature effects on crop development. *Proc. Uppsala Sympos., Plant response to climatic factors, 1970, UNESCO, Paris, 1973, S. 327—343.*
- SCHRÖDTER, H.; AUST, H.-J.: An appraisal of the use of weather information in the control of plant disease epidemics. Vortrag 3. Int. Kongr. Pflanzenkrankheiten, 16. bis 23.08. 1979 München.
- SCHRÖDTER, H.; ULLRICH, J.: Eine mathematisch-statistische Lösung des Problems der Prognose von Epidemien mit Hilfe meteorologischer Parameter, dargestellt am Beispiel der Kartoffelkrautfäule (*Phytophthora infestans*). *Agric. Meteorology* 4 (1967) S. 119—135.
- STERN, V. M.; SMITH, R. F.; VAN DEN BOSCH, R.; HAGEN, K. S.: The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid. *Hilgardia* 29 (1959) S. 81—101.
- WAGGONER, P. E.; HORSFALL, J. G.: EPIDEM, a simulator of plant disease written for a computer. *Conn. Agric. Exp. Station Bull. No. 698* (1969).
- WALLIN, J. R.: Summary of recent progress in prediction of late blight epidemics in the United States and Canada. *Amer. Potato J.* 39 (1962) S. 306—312.
- WILBERT, H.: Fortschritte in der Entwicklung integrierter Pflanzenschutzsysteme. *Mitt. Biolog. Bundesanstalt f. Land- u. Forstwirtschaft H.* 178 (1977) S. 66—84.
- DE WIT, C. T. et al.: Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Wageningen/NL: PUDOC 1978.

5 H. MAYER, München Forstmeteorologie

1 Einleitung

An den verschiedenen Erdoberflächenarten werden Eigenschaften zwischen der Atmosphäre und dem Boden ausgetauscht; sogenannte Mittler zwischen dem Boden und der darüberliegenden Atmosphäre sind die pflanzlichen Bodenbedecken. Auf den gesamten Festlandsflächen nehmen die Wälder einen Anteil von etwa 33% (BAUMGARTNER, 1971) ein, so daß sie zu den dominierenden Erdoberflächenbedeckungsarten zählen. Mit diesem bedeutenden Anteil nehmen sie am Austausch von Energie, Wasser oder Wasserdampf und Luftbeimengungen in vertikaler und horizontaler Richtung an der Untergrenze der bodennahen Atmosphäre teil (Tab. 1).

Die Wissenschaft, die sich mit dieser Problematik beschäftigt, wird allgemein „Forstmeteorologie“, manchmal auch „Forstliche Meteorologie“, genannt. Da sie als Inhalt die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen der atmosphärischen Umwelt und den Objekten Baum, Baumgruppe und Wald bzw. Forst zum Ziel hat, stellt sie einen Teil der Biometeorologie und damit der angewandten Meteorologie dar.

Tab. 1: Anteile von verschiedenen Erdoberflächentypen an der gesamten Erdoberfläche (nach BAUMGARTNER, 1971).

	F l ä c h e		
	in 10 ⁶ km ²	in %	in %
Gesamte Erde	510	100	
Meere	361	72	
Landflächen	149	29	100
Waldbestände	50	10	33
Offenes Waldland	7	1	5
Ödland, ¹⁾	30	6	21
Grasland	24	5	16
Ackerland	14	3	9
Trockenwüste	9	1	6
Polargebiete	15	3	10

¹⁾ Tundra, Steppe, feuchte Flächen, Wasserflächen

In den „Entwicklungslinien der forstlichen Meteorologie“ von BAUMGARTNER (1967 a und b) ist die Forstmeteorologie als angewandte Meteorologie im Bereich von Forstwissenschaft und Forstwirtschaft definiert. Sie befaßt sich mit:

- der Atmosphäre, ihren Phänomenen, Feldern und Prozessen, am Standort und im Lebensraum der forstlichen Pflanzen und Pflanzenbestände;
- den Wirkungen der Atmosphäre auf diese;
- den Rückwirkungen von diesen auf die Atmosphäre.

Diese allgemeine Beschreibung läßt bereits erkennen, daß die Arbeiten in der Forstmeteorologie in verschiedene Richtungen zielen; die heute noch aktuellen Probleme hat schon BAUMGARTNER (1967 a) wie folgt zusammengefaßt:

- a) Erforschung des Waldklimas (Baumstämme als Versuchsobjekte, Stammraumklima im Vergleich zum Klima des waldfreien Landes, Bestandsklima, besondere Eigenschaften der Waldluft);
- b) Energiebilanz des Waldes;
- c) Forstliche Hydrometeorologie (Wasserhaushalt des Waldes);
- d) Klima am Waldstandort — forstlich klimatologische Standortserkundung;
- e) Waldklima und Landesklima;
- f) Forstliche Biometeorologie;
- g) Wetterschäden im Wald.

Obwohl die forstmeteorologische Forschung eine mehr als 100jährige Tradition hat — BAUMGARTNER (1967 a) berichtet von Untersuchungen in New York schon in den Jahren 1745—1783, als Baumstämme angebohrt und Thermometer hineingesteckt worden sind, um zu messen, wie kühl oder warm Bäume im Vergleich zur umgebenden Luft sind — existiert bis heute fast kein Lehrbuch, das die gesamte Spektrumsbreite der Forstmeteorologie beinhaltet. Neben sehr vielen Arbeiten über einzelne forstmeteorologische Problemstellungen gibt es aber Bücher, die größere Teilgebiete der Forstmeteorologie umfassend behandeln. Beispielhaft seien hier KITTREDGE (1948), GEIGER (1961), MONTEITH (1975, 1976), LEE (1978, 1980) und ROSS (1981) genannt.

In diesem Zusammenhang muß darauf hingewiesen werden, daß die Arbeitsweisen in der Forstmeteorologie früher neben beobachtender fast ausschließlich experimenteller Art waren, während heute zu Experimenten im Freiland und Labor immer mehr theoretische Arbeiten, wie z.B. im Rahmen der Ökologie der forstlichen Produktion (GATES, 1980), hinzukommen.

2 Waldklima

2.1 Baumstämme als Versuchsobjekte

Baumstämme waren nahezu die ersten Versuchsobjekte in der Forstmeteorologie, und auch heute besteht noch großes Interesse an ihnen, besonders in Zusammenhang mit Hitze- und Frostschäden an der Rinde freigestellter Bäume am Bestandsrand, den Dürreschäden an Jungpflanzen in der sommerlich überhitzten bodennahen Luftschicht, den Risseschäden an gelagerten Baumstämmen und dem Radialwachstum von Baum-

stämmen in Abhängigkeit von den Umgebungsluftbedingungen. Aufgrund zahlreicher Untersuchungen ist heute ziemlich genau bekannt, wie die Wärme in Baumstämmen in Abhängigkeit von der Besonnung sowie der Rindenstärke, -rauigkeit und -farbe transportiert wird, welche Oberflächentemperaturen die Baumstämme haben, welche Spannungen im Kambium, zwischen Kambium und Holz sowie im Holz auftreten, und welche Wirkungen die Überhitzung der Baumrinde auf deren Stoffumsatz hat (Abb. 1).

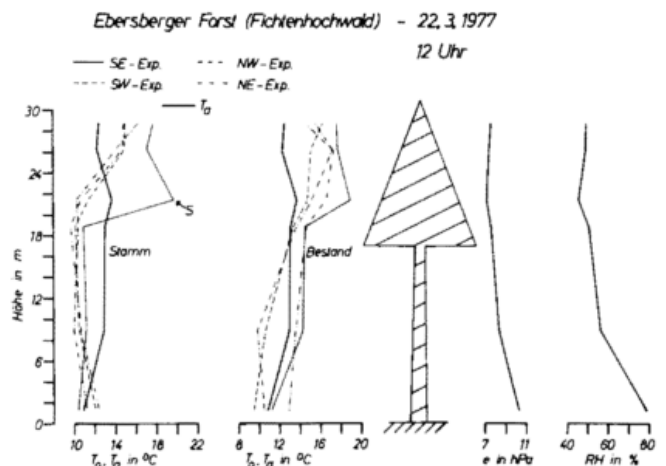


Abb. 1: Vertikalprofile der Oberflächentemperaturen T_0 eines Fichtenstammes und eines -bestandes bei verschiedenen Expositionen sowie der Lufttemperatur T_a , des Dampfdruckes e und der relativen Luftfeuchtigkeit RH am 22. 3. 1977, einem Strahlungstag, S: Meßfeld direkt von der Sonne beschienen.

2.2 Stammraumklima im Vergleich zum Klima des waldfreien Landes

Schon ab Mitte des letzten Jahrhunderts gibt es Arbeiten, die sich mit der Frage befassen, welchen Einfluß der Wald auf die Klimaelemente ausübt, wie sich das Waldklima vom Klima der offenen Feldflur unterscheidet, und welchen Einfluß die Wälder auf die klimatischen Verhältnisse des Landes haben. Kennzeichnend für die ersten Untersuchungen war die Idee der forstlichen „Doppel- oder Parallelstationen“, d.h. Klimastationen im Wald waren Freilandstationen in etwa 100 bis 200 m Entfernung vom Waldrand zugeordnet.

Die wichtigste Erkenntnis aus diesen Untersuchungen war, daß es im Wald ein eigenes Klima gibt, das sich meßbar vom Freilandklima unterscheidet. So ist die Lufttemperatur T_a im Stammraum eines relativ geschlossenen Altbestandes von Oktober bis Februar im Mittel um etwa 0.6 K wärmer als im nahe gelegenen Freiland; von März bis September ist sie im Waldinneren im Mittel um etwa 1.0 K niedriger als im Freiland. Infolge der abschirmenden Wirkung der Baumkronen wird der Tagesgang von T_a im Stammraum des Waldes erheblich gedämpft, und zwar am prägnantesten an heiteren Sommertagen.

Zwischen Nadel- und Laubwald mit Belaubung bestehen hinsichtlich des Klimas im Stammraum keine merklichen Unterschiede. Die jeweilige Bestandsgeometrie (u. a. Bestockungsgrad, Überschirmung, Blattflächenindex, . . .) übt dagegen erheblichere Einflüsse auf das Stammraumklima aus.

Forstliche Doppelstationen gibt es zwar heute kaum mehr; die daraus erzielten Ergebnisse stellen jedoch den Grundstein für die forstliche Bestandsklimatologie dar.

2.3 Bestandsklima

Entsprechend seiner Bestandsgeometrie ist ein Bestand auch in meteorologischer Hinsicht vertikal gegliedert. Nach BAUMGARTNER (1967 a) unterscheidet man hier zweckmäßigerweise folgende Zonen:

- Waldoberfläche
- Kronenraum
- Stammraum
- Waldboden.

Im Sinne von mikroklimatischen Grenzflächen trennt man aufgrund eigener Gesetzmäßigkeiten zwischen den Pflanzenoberflächen und den Bodenoberflächen.

Bei einem entsprechenden Kronenschlußgrad (= Maßzahl für die Überschirmung des Waldbodens durch die Baumkronen) übernimmt die Waldkrone mit ihrer Nadel- oder Laubmasse Aufgaben, die im waldfreien Land der Erdoberfläche bzw. den niederen Bodendecken zukommen. Sie reflektiert, absorbiert und emittiert Strahlung und erweist sich dadurch tagsüber als wärmste und nachts oft als kälteste Bestandszone. Über die Transpiration gibt sie den Wasserdampf ab und stellt damit eine Feuchtequelle dar. Durch die große aerodynamische Rauigkeit der Krone bremsst sie den Wind im Bestand und erhöht über dem Bestand die dynamische Windturbulenz. Die Waldkrone bildet somit die energetisch bedeutende Oberfläche, während der Oberfläche des Waldbodens nur noch wenig Bedeutung als Energieumsetzungsfläche zukommt (Abb. 2).

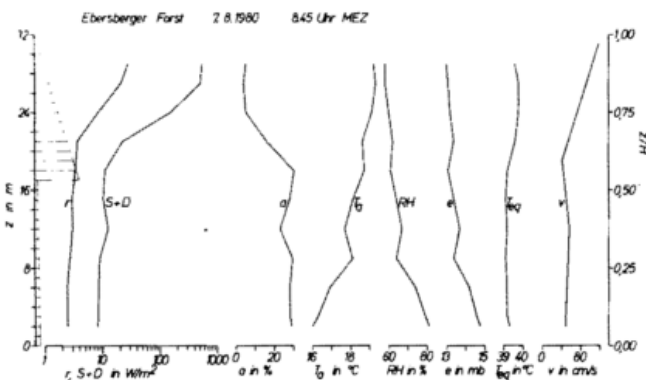


Abb. 2: Vertikalprofile der Globalstrahlung S + D, der kurzwelligen Reflexstrahlung r, der Albedo a, der Lufttemperatur T_a , der relativen Luftfeuchtigkeit RH, des Dampfdruckes e, der Äquivalenttemperatur T_{eq} und der Windgeschwindigkeit v am 7.8.1980, einem schönen Sommertag, um 8.45 Uhr im Ebersberger Forst (Fichtenhochwald); nach MAYER (1981) (b).

Die Bestandsklimatologie ist das am besten entwickelte Teilgebiet der Forstmeteorologie (GEIGER, 1961, BAUMGARTNER, 1967 a). Viele meteorologische Parameter sind in Abhängigkeit vom breiten Spektrum der Bestandsarten und -alter untersucht; auch Übergangsklimate am Bestandsrand sind hinreichend erforscht.

Die neueren Zielsetzungen auf diesem Gebiet gehen in Richtung der analytischen Darstellung der vertikalen Verteilung von meteorologischen Parametern im Bestandsraum. Als unabhängige Variablen finden vertikale Verteilungen von Bestandsparametern, wie z. B. dem Blattflächenindex, Verwendung. Angestrebt werden mathematisch beschreibbare Modelle des Bestandsklimas.

2.4 Besondere Eigenschaften der Waldluft

Die Waldluft wird häufig wegen ihrer „Frische, Reinheit und Aromatik“ gelobt. Untersuchungen über die speziellen Eigenschaften der Waldluft sowie über ihre Funktion und Wirkung auf den Menschen existieren jedoch noch nicht in ausreichendem Maß. Besonders gilt das für die Natur und Quantität der ätherischen Öle (Terpene), Harze und anderer Aromastoffe, welche die Würze der Waldluft prägen. Bekannt ist aber schon, daß die Konzentrationen der ätherischen Stoffe in der Waldluft so groß sind, daß sie im therapeutischen Sinne anregend wirken; die Konzentrationen sind aber viel zu gering, als daß sie schädliche Einflüsse ausüben könnten.

Durch den Gaswechsel an Blättern, Nadeln und anderen Pflanzenoberflächen sowie an der Waldbodenoberfläche stehen die Wälder in enger Beziehung zur Atmosphäre. Durch den Prozeß der photosynthetischen Produktion wird tagsüber der Luft CO_2 entzogen und O_2 zugeführt. Nachts fließt im Prozeß des Metabolismus CO_2 an die Luft zurück, und dieser wird O_2 entnommen (Tab. 2). Der Umsatz von CO_2 und O_2 ist unter allen Festlandsflächen bei den Wäldern am größten (BAUMGARTNER, 1971). Es ist noch nicht endgültig geklärt, in welchem Ausmaß ein forstliches System, global betrachtet, eine CO_2 -Senke oder -Quelle für die Atmosphäre darstellt oder mit ihr im CO_2 -Gleichgewicht steht. Die Bedeutung dieser Frage liegt darin, daß der CO_2 -Vorrat der Atmosphäre, gemessen an den CO_2 -Umsätzen, relativ klein ist.

Tab. 2: Beispiel für die CO_2 -Umsätze von Wäldern: Jahressummen der Bruttoassimilation (BAR), der Respiration (RR) und der Nettoassimilation (NAR) in der Kronenschicht des Ebersberger Forstes (Fichtenhochwald) im Jahre 1972 (nach HAGER, 1975).

	in t CO_2 /ha · a	in %	in %
BAR	45.7	100.0	—
RR	19.4	42.5	—
NAR	26.3	57.5	—
davon:			
Schattenkrone	11.8	—	44.9
Sonnenkrone	14.5	—	55.1

In diesem Zusammenhang muß auch erwähnt werden, daß durch die zur Zeit noch weitgehend unkontrollierte Waldwirtschaft in den Tropen beträchtliche Eingriffe in den CO_2 -Haushalt erfolgen (BAUMGARTNER, 1982), deren komplexe Auswirkungen, u. a. auf das Klima, noch nicht eindeutig bekannt sind.

Die Bedeutung des Waldes als „grüne Lunge“ ist gering. Die Bruttoabgabe der Wälder der Erde an O_2 beträgt etwa 1/22000 des O_2 -Vorrats der Atmosphäre; die Nettoabgabe, d. h. bei Berücksichtigung der Respiration, ist nahezu ver-

nachlässigbar gering. Auch lokal ist die Bedeutung des Waldes für die Nettoabgabe an O₂ klein (BRÜNIG, 1972).

Für Aerosole und feste Luftbeimengungen stellen Wälder aufgrund ihrer intensiven Oberflächengliederung und der damit erhöhten dynamischen Turbulenz an der Bestandsoberhöhe (MAYER, 1981 a) aktive Filter dar. Für Fremdgase in der Atmosphäre ist diese Filterwirksamkeit äußerst gering.

Im Rahmen der in der Gegenwart kritischen Waldsituation, die besonders in unserem Lande durch das Kennwort „Baumsterben“ geprägt ist, rückt der Stoffhaushalt der Waldbestände immer mehr in den Mittelpunkt von Untersuchungen. Fest steht, daß die Atmosphäre den Beständen im Aerosol und mit dem Niederschlag große Mengen von „Bioelementen“ in fester oder gelöster Form zuführt. Inwieweit die damit in Verbindung gebrachten „sauren Niederschläge“ primäre Verursacher des gegenwärtigen Baumsterbens oder nur verschärfende Teilverursacher sind, bedarf noch einer endgültigen Klärung (BAUMGARTNER, 1982).

Schließlich soll darauf hingewiesen werden, daß gerade in Landschaften mit hoher Besiedlungsdichte oder Industrialisierung die sogenannte „Platzhalterwirkung“ der Wälder lufthygienisch von großer Bedeutung ist, denn wo Wälder stehen, können sich nicht zugleich Emittenten befinden.

3 Energiebilanz des Waldes

Um die Energiebilanz eines Waldes aufstellen zu können, muß man wissen, wieviel Energie dem Wald in einer bestimmten Zeit zufließt, und wozu sowie in welchen Teilbeträgen diese im Wald verwendet wird. In der Energiebilanz eines Waldes

$$R_n + B + L + V + P + K = 0 \quad (1)$$

ist die Strahlungsbilanz (R_n) die primäre Energiequelle oder -senke, der der Bodenwärmestrom (B), der Strom fühlbarer Wärme (L), der Strom latenter Wärme (V), der Wärmestrom in der Pflanzenmasse und in der Luft des Bestandsraums (P) sowie der Energieumsatz bei der Assimilation (K) gegenüberstehen.

Von der Strahlungsbilanz (R_n) werden alle Terme im Waldraum quantitativ und qualitativ modifiziert (u. a. SCHOTT, 1980, ROSS, 1981, Abb. 2 und 3). Im Vergleich zu anderen Oberflächenbedeckungsarten ist die Albedo a von Wäldern gering. Im Mittel beträgt a für Nadelwälder 10%, für Laubwälder 15%, hingegen für Grünland 25% und für sommerdürres Getreideland 35% (BAUMGARTNER, 1966). Wälder absorbieren also viel vom Globalstrahlungsangebot und reflektieren davon nur wenig. Somit beeinflussen sie u. a. auch das Lichtklima der Landschaft, indem physiologisch unangenehme Blendlichter ausgeschaltet werden.

Die Vielfachüberschirmung des Waldbodens durch die Oberflächen von Nadeln, Blättern, Zweigen, Ästen, . . . führt zu einer scharfen Abnahme der Strahlungsintensität von der Licht- zur Schattenkrone und zum Stammraum hin (ROSS, 1981). Die die Wälder kennzeichnenden relativ niedrigen Oberflächentemperaturen bei Tage sind u. a. eine Folge der Aufteilung der Strahlungsenergie auf die ganze Tiefe des Bestandsraums (Abb. 4). Wälder emittieren deshalb weniger langwellige Strahlung als andere Oberflächenbedeckungsarten; da sie jedoch viel kurzwellige Strahlung absorbieren, haben sie ein relativ hohes R_n .

Ebersberger Forst Summer 1980
(4 clear days)

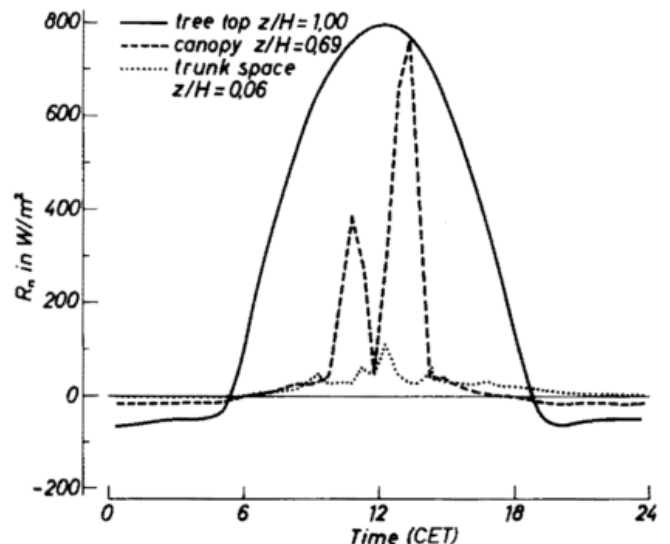


Abb. 3: Mittlere Tagesgänge der Strahlungsbilanz R_n an der Bestandsoberhöhe ($z/H = 1.00$), im Kronenraum ($z/H = 0.69$) und im Stammraum ($z/H = 0.06$) des Ebersberger Forstes (Fichtenhochwald); Zeitraum: 23.7.1980 — 26.7.1980 (schöne Sommertage); nach MAYER (1981) (b).

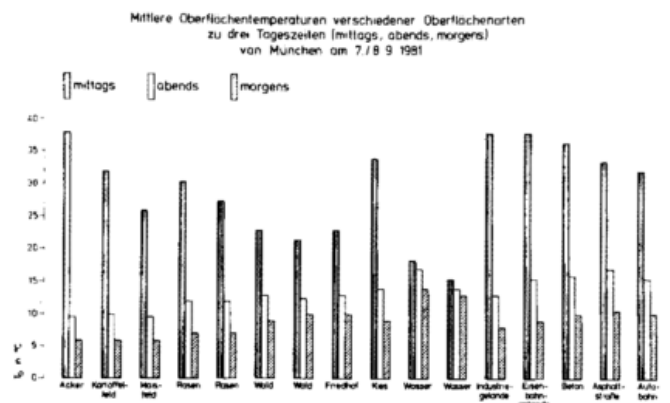


Abb. 4: Mittlere Oberflächentemperaturen T_0 von verschiedenen urbanen Oberflächenarten zur Mittagszeit, abends nach Sonnenuntergang und morgens vor Sonnenaufgang im Spätsommer; aus Thermalbildern von München vom 7.9.1981/8.9.1981 (nach BAUMGARTNER et al., 1982).

An einem Sommertag werden davon etwa 10% für B und P verwendet; 20—30% entfallen auf L, 60—70% auf V und etwa 2% auf K. Der hohe „Strahlungsenergiegewinn“ von Wäldern wird also in erster Linie durch eine intensive Wasserverdunstung in Anspruch genommen (BAUMGARTNER, 1956, STRAUSS, 1971). Wegen des Strahlungsumsatzes im Bestandsraum und des großen Energieaufwandes für die Verdunstung werden die Waldkronen an Hochsommertagen zu willkommenen Kühlflächen und Wasserdampfquellen in der Landschaft. An Wintertagen stellen dagegen die schneefreien Waldkronen aufgrund ihrer großen Strahlungsabsorptionsfähigkeit Wärmequellen in der Schneelandschaft dar.

Die Energiebilanzmethode hat auch Eingang in die Pflanzenphysiologie gefunden. Man kann Pflanzenkörper durch geometrische Grundformen, wie z. B. ebene Flächen, Zylinder, Kegel, Kugel, . . . , annähern, für die die Gesetzmäßigkeiten des Energieaustausches weitgehend untersucht sind (GATES, 1962, 1980). So weiß man, daß Pflanzenteile an ihrer Oberfläche wie physikalische Körper reagieren, und daß die unter den Oberflächen ablaufenden Prozesse von außen her energetisch gesteuert werden (GATES und PAPIAN, 1971).

4 Forstliche Hydrometeorologie

In der Wasserbilanz eines Waldes

$$N = A + V' + R + B' \quad (2)$$

sind die Terme Niederschlag (N) und Verdunstung (V') seit jeder meteorologische Meßgrößen, während sich die Hydrologie, Bodenkunde und andere Disziplinen u. a. mehr mit dem Abfluß (A), der Rücklage im Boden (R) und dem Verbrauch (B'), z. B. durch Bindung in der Pflanzenmasse, beschäftigen. Der Niederschlag an der Waldbodenoberfläche (N_o) setzt sich zusammen aus dem durchfallenden Wasser (N_f), dem abtropfenden Wasser (N_i) und dem Stammabfluß (N_s). In A sind enthalten der Oberflächenab- oder -zufluß (A_o), der unterirdische Hangwasserabfluß (A_i), die Sickerwassermengen (S_i) einschließlich kapillarem Steigwasser und die Wasserdampfdiffusion. Die Verdunstung (V') ist im Wald aufzuteilen in die Transpiration (T), die Interception (I) und die Evaporation, vorwiegend der Waldbodenoberfläche, (E). Die forstliche Hydrometeorologie hat es somit mit einer ganzen Reihe von Termen der Wasserbilanz und deren Variationen durch Bestandsart, -dichte, -geometrie, . . . zu tun.

Von den sehr zahlreichen Untersuchungen in diesem Fachgebiet seien hier einige Tendenzen kurz aufgeführt. So können Wälder das Niederschlagsangebot aus der Atmosphäre nur sehr geringfügig erhöhen; an Gebirgskämmen und Berggipfeln beeinflussen sie über das Ausfiltern von Nebeltröpfchen jedoch lokal die Niederschlagsmenge in etwas größerem Ausmaß.

Durch die Niederschlagszurückhaltung und Verdunstung in den Baumkronen (= I) wird den Waldböden knapp 1/3 des Niederschlagsangebots vorenthalten. Der Relativwert von I nimmt mit wachsender Regenmenge ab, während sich der Absolutwert von I auf einen vom jeweiligen Bestand abhängigen Grenzwert, dem Kronenbenetzungswert, in Höhe von 3 bis 10 mm einpendelt. Mit steigender Überschildung des Waldbodens durch die Baumkronen wächst auch I; im allgemeinen ist I für einen Laubwald kleiner als für einen Nadelwald. Die über I zurückgehaltene Wassermenge eines Bestandes hängt nicht nur von der Niederschlagsmenge selbst, sondern auch von der zeitlichen Verteilung des Niederschlags ab.

Aus einer von BAUMGARTNER (1966) aufgestellten Rangordnung des prozentualen Anteils von V' am Jahresniederschlag (N) für verschiedene Oberflächenbedeckungsarten geht hervor (Tab. 3), daß Wälder die niederen Bodendecken im Wasserverbrauch übertreffen und fast wie offene Wasserflächen verdunsten (Fichtenwald: V'/N = 70%; offene Wasserflächen: V'/N = 75%). Die unterschiedliche Verdunstung der verschiedenen Oberflächenbedeckungsarten hat nicht nur Konsequenzen für die Wasserbilanz von Einzugsgebieten sondern über die Verdunstungswärme bzw. den Strom latenter

Tab. 3: Prozentualer Anteil der Verdunstung (V') am Jahresniederschlag (N); nach Lysimeterbeobachtungen in mittleren Breiten in strahlungsarmen und feuchten Jahren (Min), in strahlungsreichen und trockenen Jahren (Max) und im Mittel (Mit); nach BAUMGARTNER (1966).

	Min	Mit	Max
vegetationsloser Boden	25	30	50
Ackerland, Getreide	25	40	55
Ackerland, Hackfrüchte	25	45	60
Dauergrünland	25	65	65
Nadelwald	30	70	80
offene Wasserflächen	30	75	85
nasse Wiesen	40	100	100

Wärme auch Einfluß auf die Energiebilanz der verschiedenen vegetationsbedeckten Landschaften. Ohne nähere Erläuterung (siehe BAUMGARTNER, 1971) soll hier noch angefügt werden, daß die Verdunstung ebenso als biologischer Vorgang zu betrachten ist.

Neben den Quantitäten sind in den letzten Jahren auch die qualitativen Eigenschaften des Wassers aus dem Wald untersucht worden. Im allgemeinen hat das Wasser aus dem Wald die Qualität von Trinkwasser, aber nur solange Nitratdüngung und andere anthropogene Einflüsse vom Waldstandort ferngehalten werden (BAUMGARTNER, 1967 a, LEE 1980).

In neuerer Zeit werden intensive Anstrengungen unternommen, die Wasserbilanz des Waldes oder Teile davon in zeitlichen Abläufen modellmäßig zu simulieren. Ansätze für den Bodenwasserhaushalt und Interceptionsmodelle sind inzwischen so weit vervollständigt, daß sie in Routineuntersuchungen angewendet werden können (HALLDIN, 1979).

5 Klima am Waldstandort

Neben dem Boden, dem Wasser und dem Relief stellt das Klima eine wesentliche Einflußgröße auf das Wachstum der Pflanzen dar. Die Erfassung des Klimas am Waldstandort ist eine Aufgabe, an der zu Waldbauvergleichen, für Ertragsstudien, zur richtigen Saatgutwahl oder im Rahmen der Forsteinrichtung die Forstwissenschaft und die Forstwirtschaft in gleicher Weise interessiert sind. Die Forstmeteorologie kann sich in zwei Richtungen beteiligen:

- in der Aufbereitung der Klimadaten zu geeigneten Übersichten für die forstlichen Wuchsgebiete;
- in der Erforschung der reliefbedingten Eigenheiten des Klimas.

Für eine erste Beschreibung der klimatischen Standortverhältnisse reichen im allgemeinen die Daten aus, die von den Wetterdiensten in den Klimanetzen gesammelt und in Klimatabellen, Jahrbüchern oder Klimaatlanten publiziert werden. Eine noch immer nicht vollständig abgeschlossene Aufgabe der Forstmeteorologie liegt darin, diese Klimadaten unter Berücksichtigung der stärker aufgeschlüsselten Gebietseinteilung der naturräumlichen Gliederungen neu zu bearbeiten (HARTMANN und SCHNELLE, 1970). Die so entstehenden Tabellen und Karten müßten durch speziell forstlich interessierende Klimakenngrößen, z. B. durch phänologische Daten, Häufigkeits- und Extremwerte, erweitert werden.

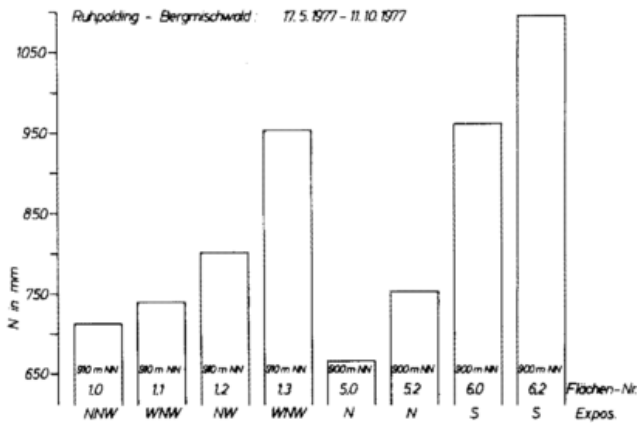


Abb. 5: Niederschlagssummen N auf Versuchsflächen im südost-bayerischen Bergmischwald mit unterschiedlicher Exposition und Überschirmung durch die Baumkronen; die Dezimalstelle bei der Flächen-Nummer gibt den Überschirmungsgrad an (0: kein Eingriff in die bestehenden Baumkronen, 1: Überschirmungsgrad 56%, 2: Überschirmungsgrad 48%, 3: Überschirmungsgrad 0%); Hangneigungen zwischen 20 und 27° (nach MAYER, 1979).

Durch das Relief, die Höhenlage und die Exposition bilden sich insbesondere in den bewaldeten Hanglagen im Mittel- und Hochgebirge Sonderklimate aus (Abb. 5), die durch die amtlichen Klimameßnetze nicht erfaßt werden können. Aufgabe der Gelände- oder Topoklimatologie ist es deshalb, durch spezielle Untersuchungen die Gesetzmäßigkeiten der orographischen Einflüsse auf das Klima zu erforschen, um im Rahmen von allgemeinen Standortskartierungen der lokalen Ökotypen die Klimafaktoren zu quantifizieren. Für diese Aufgabe gibt es drei Bearbeitungsmöglichkeiten:

- Einrichtung und Betrieb von temporären Sondermeßnetzen längs typischer Geländequerschnitte
- Durchführung von Meßgängen, -fahrten oder -flügen mit Anschluß an Basis-Klimastationen
- modellmäßige Erfassung oder Berechnung der Klimafaktoren in Abhängigkeit von Seehöhe, Exposition, Tages- und Jahreszeit.

Diese drei Lösungswege sind bei BAUMGARTNER (1967 b) ausführlich mit Angabe von entsprechenden Untersuchungen beschrieben worden.

6 Waldklima und Landesklimate

Die Frage nach der Wirkung der Wälder auf das Landesklimate steht schon seit etwa 150 Jahren im Mittelpunkt mancher forstmeteorologischer Arbeiten. Auch in der Gegenwart, in der dem Wald neben seiner Bedeutung für die Holzherstellung eine immer größere Bedeutung infolge seiner Schutz- und Wohlfahrtsfunktionen zukommt, ist diese Frage noch höchst aktuell. Sie pauschal mit „ja“ oder „nein“ zu beantworten, ist, schon wegen der Definition des Begriffs „Klimate“, nicht möglich.

Man muß hier gedanklich klar trennen zwischen der Einwirkung des Waldes auf das Klimate am Waldstandort und den sogenannten Fernwirkungen des Waldes auf die Umgebung, die

sich in horizontaler und vertikaler Richtung erstrecken. Ihre Reichweiten sind für jedes meteorologische und hydrologische Element unterschiedlich groß. Die Ausdehnung eines Waldgebiets sowie die räumliche Aufgliederung der Landschaft durch Wald, Freiland und Ballungszentren sind dabei von nicht zu unterschätzender Bedeutung.

Aus dem Energiehaushalt von Wäldern ergibt sich, daß bewaldete Landschaften Witterungsextremen, wie z. B. Sommerhitze oder Winterstrenge, weniger stark ausgesetzt sind. Im wald- und baumdurchsetzten Landschaftsmosaik werden vor allem in den Gebieten mit hohen Windgeschwindigkeiten der Bodenwasserhaushalt in Trockenperioden begünstigt und Verwehungen abgeschwächt, wofür in erster Linie der dann vorhandene Windschutz bzw. die Windabbremmung verantwortlich sind. Die große aerodynamische Rauigkeit von Waldlandschaften führt zu großer turbulenter Zerstreuungsfähigkeit der atmosphärischen Strömung und über den Massenaustausch zur Verdünnung der die Luft belastenden Verunreinigungen aller Art.

Das vermehrte Wissen um die Funktionen der Wälder und ihre daraus resultierende Bedeutung für Industrielandschaften und Ballungszentren erschwert dort heute berechtigterweise Entwaldungen sehr. Die Bedeutung der Wälder für das globale Klimate, auch wenn die Wechselwirkungen endgültig noch nicht erforscht sind, gibt Anlaß zu größter Sorge, wenn die großflächigen Rodungen in den Tropen im bisherigen Ausmaß weitergeführt werden (BAUMGARTNER und KIRCHNER, 1980).

7 Forstliche Biometeorologie

Die Zusammenhänge zwischen Klimate, Witterung und Wetter mit der Pflanzenentwicklung sind so groß, daß von einer meteorologischen Steuerung des Wachstums gesprochen werden kann. In der Phänologie beobachtet man so schon seit fast zwei Jahrhunderten die Eintrittszeiten von Laubentfaltung, Blüten, Früchten, Laubverfärbung, Laubfall, . . . , um den jahreszeitlichen Witterungsablauf anhand von Pflanzenphänomenen beschreiben zu können. Die Vergleichbarkeit der phänologischen Daten ist heute durch die Verwendung von genetisch einheitlichen Forstpflanzen aus sogenannten internationalen Phänologischen Gärten sehr verbessert worden.

Untersuchungen über die meteorologisch bedingte tages- und jahreszeitliche „Pulsation“ von Baumdicke, -länge und -volumen, über den Einfluß der Witterung auf den Durchmesser und den Höhenzuwachs von Bäumen sowie auf die Qualität des Holzes zählen ebenso in das Gebiet der forstlichen Biometeorologie wie das Auswerten von Jahrringbreiten als Grundlage der Dendroklimatologie (FRITTS, 1965).

Auch die gegenwärtigen, hier schon erwähnten Bestrebungen, den Mechanismus der Pflanzenproduktion im Bestand, den Beitrag der einzelnen Bestandsschichten im vertikalen Gefälle von Strahlungsenergie und Bestandsklimate und die Wirkungsweise von waldbaulichen Eingriffen auf die forstliche Produktion modellmäßig zu erfassen und diese Modelle mit geeigneten Eingangsdaten zu verifizieren, gehören zum Teil in dieses Fachgebiet (HALLDIN, 1979).

In der forstlichen Biometeorologie werden jedoch auch die Wirkungen des Waldes auf den Menschen untersucht, der sich dort aufhält. Die Waldatmosphäre wird hier mehr als

Erholungs- und Freizeitraum angesehen; sie weist aufgrund ihrer sogenannten Wohlfahrtswirkungen die typischen Eigenschaften eines Schonklimas auf (MAYER, 1977).

8 Wetterschäden im Wald

Wetterschäden im Wald stören nicht nur die Ordnung und den geplanten Betriebsablauf im Wald, sie sind auch von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Von den Wetterschäden durch Winter-, Spät- und Frühfröste, durch Hagel, Schnee, Eis, Wasser, Wind, Sturm, Hitze, Dürre, Blitz oder Brand sind einige unvermeidbar, während sich andere bei Kenntnis der Ursachen und Zusammenhänge einschränken lassen. Die Erforschung der Schadensursachen sowie das Konzipieren und Erproben von Maßnahmen zur Schadensverhütung zählen zu den Aufgaben der Forstmeteorologie, die im unmittelbaren Interesse der Forstwirtschaft liegen.

Schon frühzeitig befaßte man sich mit den Frostschäden im Wald. Die Bedeutung der Energiebilanz, insbesondere des Bodenwärmestroms, bei der Nachtfrostentwicklung ist weitgehend untersucht. Auch kennt man den Einfluß des Mikroklimas auf die Gesetzmäßigkeiten der Kaltluftschichtung in der bodennahen Luftschicht recht genau. Über Kartierungen von frostgefährdeten Zonen können zur Abwehr von Frostschäden Angaben über geeignete Sorten- und Standortwahl gemacht werden.

Eisbrüche, Schneebrüche, Dürre- und Blitzschäden stellen für die Forstwirtschaft Katastrophen dar, die weitgehend hingenommen werden müssen. Die Sturmschäden im Wald, deren Verursacher böige Windlasten sind, die aber auch vom Geländere relief, vom Bodenzustand und zahlreichen forstlichen Faktoren, wie z. B. dem h/d-Verhältnis (h: Baumhöhe, d: Baumstammdurchmesser in 1.3 m Höhe über dem Waldboden) oder der Baumart, beeinflusst werden, lassen sich bei bekanntem Energieübertragungsprozeß vom „Erreger“ (= böige Windlasten) (Abb. 6) auf die „Reaktion“ (= schwingende Bäume) (Abb. 7) durch geeignete waldbauliche Maßnahmen herabsetzen; dabei werden Kenngrößen des Systems „schwingende Bäume“ verändert. Die bisherigen Beobachtungen zeigen aber, daß bei starken Stürmen mit Spitzböengeschwindigkeiten über 28 m/s nahezu keine Möglichkeiten zur Herabsetzung der dann auftretenden Sturmschäden bestehen.

Die Zusammenhänge zwischen der Witterung und der Entstehung von Waldbränden sind seit der unter meteorologischen Gesichtspunkten erstellten bayerischen Waldbrandstatistik (siehe BAUMGARTNER, 1967 b) so genau geklärt, daß sogar eine Kennziffer, der Waldbrandgefahrenindex, für die tägliche Waldbrandgefahr aufgestellt werden kann. In den Ländern, in denen Waldbrände häufiger auftreten und deshalb auch eine größere wirtschaftliche Bedeutung als in unserem Land besitzen (z. B. U.S.A., Kanada, Australien, Frankreich), sind solche auf meteorologischen Daten beruhende Kennziffern schon lange in Gebrauch.

9 Schlußbemerkung

Die vorangehende, oft nur stichpunktartige Übersicht, die zum Teil im Stil von Aufzählungen und Aneinanderreihungen gehalten werden mußte, belegt sehr deutlich, daß die Forstmeteorologie ein selbständiges Fachgebiet mit einem sehr großen, komplexen Arbeitsbereich ist, der manchmal etwas hete-

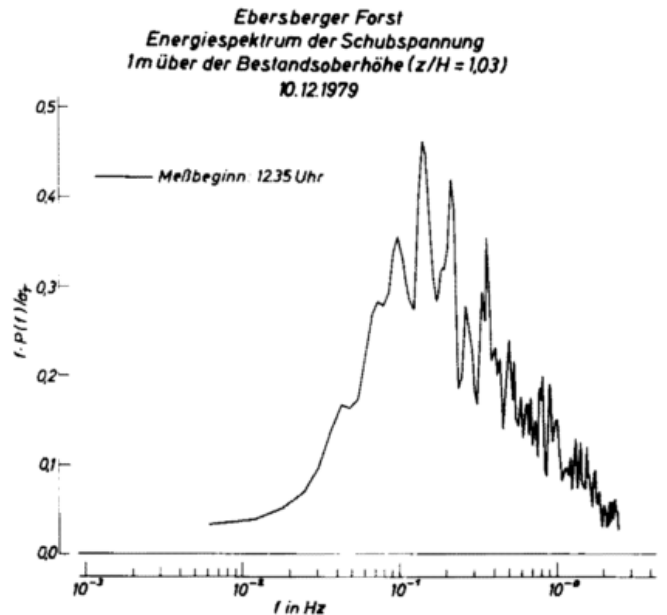


Abb. 6: Mit der Standardabweichung normiertes Energiespektrum der Schubspannung nahe an der Bestandsoberhöhe eines Fichtenhochwaldes (Ebersberger Forst) bei einer Starkwindlage.

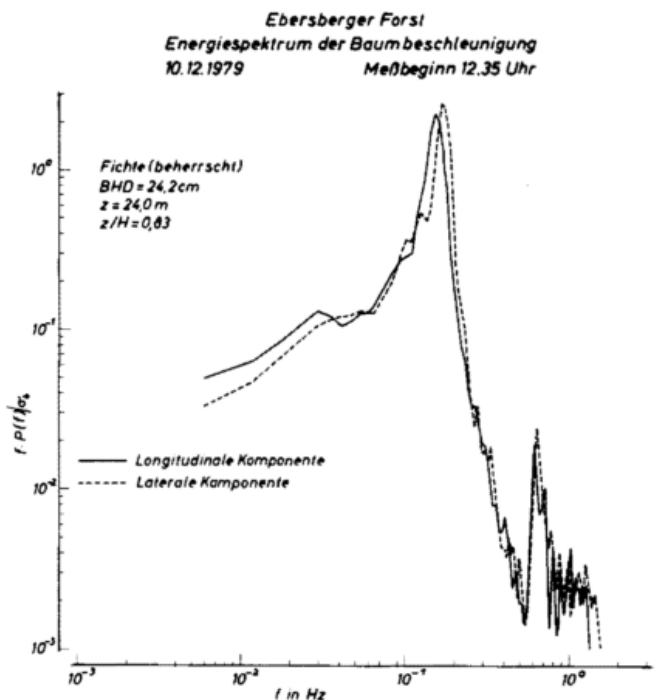


Abb. 7: Mit der Standardabweichung normierte Energiespektren der longitudinalen und lateralen Komponenten der windinduzierten Beschleunigung einer Fichte (Ebersberger Forst) in 24 m Höhe über dem Waldboden.

rogen erscheint. Obwohl in der Forstmeteorologie durchaus immer noch experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, wobei teilweise mit sehr genauen Meßsystemen gearbeitet wird, existiert auch hier die große Tendenz, auf der Grundlage von bekannten Meßergebnissen die Zusammenhänge und Prozesse analytisch in Form von Modellen aufzuzeigen.

Literatur

- BAUMGARTNER, A.: Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes. Ber. DWD Nr. 28 (1956).
- BAUMGARTNER, A.: Energetic bases for differential vaporization from forest and agricultural stands. Repr. Int. Symp. Forest Hydrol. 1966, S. 381—389.
- BAUMGARTNER, A.: Entwicklungslinien der forstlichen Meteorologie — Teil I. Forstw. Cbl. 86 (1967) S. 156—175 (a).
- BAUMGARTNER, A.: Entwicklungslinien der forstlichen Meteorologie — Teil II. Forstw. Cbl. 86 (1967) S. 201—220 (b).
- BAUMGARTNER, A.: Wald als Austauschfaktor in der Grenzschicht Erde/Atmosphäre. Forstw. Cbl. 90 (1971) S. 174—182.
- BAUMGARTNER, A.: Wald und Biosphäre. Allg. Forstz. 37 (1982) S. 615—621.
- BAUMGARTNER, A.; KIRCHNER, M.: Impacts due to deforestation. In: Interactions of Energy and Climate. London: Reidel Publ. Comp. 1980. S. 305—316.
- BAUMGARTNER, A.; MAYER, H.; BRÜNDL, W.; E.-M. NOACK: Kurzmittteilung Nr. 4 (1982) zu STADTKLIMA BAYERN.
- BRÜNIG, E.: Wirkungen des Waldes auf die Umwelt des Menschen. Ber. Landw. 50 (1972) S. 157—168.
- FRITTS, H. C.: Tree-ring evidence for climatic changes in western North America. Mon. Weath. Rev. 93 (1965) S. 421—443.
- GATES, D. M.: Energy exchange in the biosphere. New York: Harper & Row. 1962.
- GATES, D. M.: Biophysical ecology. New York: Springer-Verlag. 1980.
- GATES, D. M.; PAPIAN, LaV. E.: Atlas of energy budget of plant leaves. New York: Academic Press. 1971.
- GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig: Vieweg-Verlag 1961.
- HAGER, H.: Kohlendioxidkonzentrationen, -flüsse und -bilanzen in einem Fichtenhochwald. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München Nr. 26 (1975).
- HALLDIN, S.: Comparison of forest water and energy exchange models. Kopenhagen: Intern. Soc. Modell. 1979.
- HARTMANN, F. K.; SCHNELLE, F.: Klimagrundlagen natürlicher Waldstufen und ihrer Waldgesellschaften in deutschen Mittelgebirgen. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag 1970.
- KITTREDGE, J.: Forest influences. New York: McGraw-Hill 1948.
- LEE, R.: Forest microclimatology. New York: Columbia University Press 1978.
- LEE, R.: Forest hydrology. New York: Columbia University Press 1980.
- MAYER, H.: Die menschliche Wärmebilanz im Sommer in einer Wald-, einer Stadt- und einer Meeresküstenatmosphäre. Arch. Meteorol. Geoph. Biokl., Ser. B 25 (1977) S. 177 bis 189.
- MAYER, H.: Mikroklimatische Untersuchungen im ostbayerischen Bergmischwald. Arch. Meteorol. Geoph. Biokl., Ser. B 27 (1979) S. 247—262.
- MAYER, H.: Die Windböigkeit an der Baumoberhöhe in einem Fichtenwald. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B 29 (1981) S. 181—190 (a).
- MAYER, H.: The vertical distribution of the net radiation budget within a spruce forest in summer. Arch. Meteorol. Geoph. Biokl., Ser. B 29 (1981) S. 381—392 (b).
- MONTEITH, J. L.: Vegetation and the atmosphere. Vol. I. London: Academic Press 1975.
- MONTEITH, J. L.: Vegetation and the atmosphere. Vol. II. London: Academic Press 1976.
- ROSS, J.: The radiation regime and architecture of plant stands. London: Dr. Junk Publ. 1981.
- SCHOTT, R.: Untersuchungen über die Energiehaushaltskomponenten in der atmosphärischen Grenzschicht am Beispiel eines Kiefernbestandes in der Oberrheinebene (Hartheim/Rh.). Ber. DWD Nr. 153 (1980).
- STRAUSS, R.: Energiebilanz und Verdunstung eines Fichtenwaldes im Jahre 1969. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München Nr. 22 (1971).

K. HÖSCHELE, Karlsruhe

6 Die Wirkung meteorologischer Bedingungen auf den Menschen

1 Einleitung

Aus dem weiten Feld der Biometeorologie des Menschen werden beispielhaft nur wenige grundlegende Gedanken verfolgt. Besonders die auch quantitativ formulierten Modellvorstellungen zum Problem Reiz und Reaktion können dazu dienen, die Einwirkungen des komplizierten Systems Atmosphäre auf das noch schwer erfassbare menschliche Verhalten, wenigstens in Teilaspekten, richtig zu beschreiben.

2 Systeme zur Erfassung der Umwelt und des inneren Zustands

In den langen Zeiträumen der Entwicklungsgeschichte hat sich ein das Überleben unter den vorherrschenden Umweltbedingungen sicherndes Instrumentarium zur Wahrnehmung dieser äußeren Bedingungen und des davon abhängigen inneren Zustands herausgebildet. Die sensorischen Systeme be-

gnügen sich mit der Erfassung einiger enger, zur Vermittlung von Informationen geeigneter Ausschnitte aus den Gesamtbedingungen. Das Sehen z. B. beschränkt sich auf einen sehr begrenzten Bereich des Spektrums elektromagnetischer Wellen, ordnet diesem jedoch eine ganze Skala von Farbeindrücken zu. Auch in der Weiterverarbeitung der Eindrücke zu einem Gesamtbild wird die Kunst des Weglassens geübt, die bemerkenswerten Eigenschaften der Umwelt oder des Körperzustands werden herausgestellt.

Die Ausstattung des Menschen mit sensorischen Systemen kann nicht danach ausgerichtet sein, eine extrem natürliche oder eine künstliche, durch die technische Zivilisation geschaffene Umwelt zu meistern. So werden in erhöhten Konzentrationen äußerst giftige Gase oder biologisch wirksame Strahlungen zum Teil nicht unmittelbar wahrgenommen. Die Fähigkeit zur Erkenntnis von Korrelationen derartiger Risiken mit wahrnehmbaren Phänomenen — etwa dem Aussehen einer Gas- oder Strahlenquelle — bietet einen Ersatz. Sie wird im Erfolgsfall häufig einem sogenannten „Sechsten Sinn“ zugeschrieben.

Tab. 1: Übersicht der sensorischen Systeme

Sinn (Modalität)	Lokalisation des Sinnesorgans	Erfasste meteorologische Bedingungen
Sehen	Auge	Solare Strahlung und ihre Wechselwirkung mit der Umwelt
Hören	Ohr	Schallausbreitung, Windgeräusche
Riechen	Nase	Luftbeimengungen
Schmecken	Zunge	(Aerosolpartikel)
Tasten (Druck, Bewegung)	Haut	Mechan. Windwirkung
Tiefensensibilität	Muskeln, Gelenke	—
Kälte/Wärme	Haut, Körperkern	„Thermisches Milieu“
Schmerz	Haut, Atemtrakt, Muskeln, Bindegewebe, Gelenke, Eingeweide	Hitze, Kälte, Reizgase, Partikel
Gleichgewicht	Innenohr	—
Allgemeinempfindungen	durchweg nicht einheitlich lokalisierbar	
Hunger		—
Durst		indirekt: Lufttrockenheit
„Lufthunger“		indirekt: CO ₂ , O ₂ -Partialdruck
Müdigkeit		indirekt: allgemein gleichförmige Bedingungen — übermäßige Belastung

Die klassischen „Fünf Sinne“ umfassen nur den kleineren Teil der sensorischen Systeme des Menschen. Gerade auch an der Erfassung der meteorologischen Bedingungen sind noch andere, ähnlich leistungsfähige Systeme wesentlich beteiligt. Eine Zusammenstellung (Tab. 1) kann dies deutlich machen. Die Reihenfolge der einzelnen „Sinne“ kennzeichnet in etwa den Übergang von hoch spezialisierten und klar abgegrenzten Organen zu diffus über den Körper verteilten sensorischen Systemen. Sie dienen zum Teil der Erfassung einer fernerer, zum Teil einer näheren Umwelt und schließlich, im Zusammenhang damit, des eigenen Körperzustands. Typisch für diesen Übergang ist der sogenannte Tastsinn, dessen verschiedenartige, über die Haut verteilte „Fühler“ Verformungen aufnehmen, d. h. einen Zustand nahe der Grenzfläche unter dem unmittelbaren Einfluß der Umwelt. Die damit verwandte „Tiefensensibilität“ dagegen erfährt interne Vorgänge wie die Bewegung und Belastung von Gelenken und Muskeln. Ein anderes Beispiel ist der außerhalb der klassischen Fünf angesiedelte Temperatursinn. Auch hier sind die Fühler in der Haut verteilt, deren thermisches Verhalten sehr stark durch die Umgebung mitbestimmt wird. Sie werden ergänzt durch Fühler für die Temperatur des von den Umweltbedingungen abgeschirmten Körperkerns. Ihre biometeorologisch herausragende Rolle wird im Beitrag 7 (JENDRITZKY) besonders behandelt.

3 Physiologische Grundlagen, Reiz und Reaktion

Umwelteigenschaften, z. B. meteorologische Bedingungen, werden erst durch die Einwirkung auf Organe zu Reizen. Der Reiz erhält seine Qualität durch die Reaktion mit den aufnehmenden Zellen, den Rezeptoren, in der Sprache der Meßtechnik mit den Fühlern oder Gebern. Sie sind durch ihren Aufbau und ihre Lage im Körper an die Aufnahme von Reizen ihrer Qualität, z. B. einen spektralen „Kanal“, angepaßt. Die spezifischen Reize lösen in den zugehörigen Rezeptoren Potentialänderungen aus — durch Änderungen des Ionentransports in den Zellmembranen. Die über Nervenfasern weitergeleiteten „Aktionspotentiale“ sind für alle Reizqualitäten gleich, Impulsfolgen unterschiedlicher Frequenz; die Qualität ergibt sich durch die Zuordnung zum Rezeptortyp. Die Reizstärke oder -intensität bestimmt die Impulsfrequenz als Reizantwort. Die Beziehungen zwischen Reizstärke und -antwort sind charakteristisch für die verschiedenen Rezeptoren und zudem entscheidend vom Zeitverlauf des Reizes abhängig. Nach der Integration der Nervenerregungen im Zentralnervensystem können vegetative Reaktionen ablaufen — z. B. Änderungen der Hautdurchblutung —, parallel dazu Änderungen des Bewegungsverhaltens. Dem Sinnesreiz entsprechende Sinneseindrücke oder -empfindungen setzen ein Subjekt mit einem Bewußtsein voraus, wenn es zusätzlich seine Erfahrungen einbringt, wird aus den Eindrücken eine begrifflich faßbare Wahrnehmung, die zusätzlich eine emotionelle Färbung bekommen kann, z. B.: „Wie schön, daß es endlich regnet“. Zwischen dem Reiz und der subjektiven Reaktion stehen demnach eine ganze Kette von Relationen, vergleichbar mit einem mehrstufigen Abbildungsverfahren, das am Ende zu sehr verschiedenartigen Ergebnissen führen kann.

In der Bioklimatologie dient der Begriff „Reizklima“ zur Charakterisierung eines lokalen Klimas mit besonders intensiven meteorologischen Reizen. Neben dem Gegenstück „Schonklima“ mit geringen Reizintensitäten wird noch nach

der Qualität der Reize ein „belastendes Klima“ unterschieden. Der physiologische Begriff Reiz ist zunächst jedoch neutral, er enthält keine Aussagen über die Intensität und keine Wertung der Qualität. In der Kette der Relationen zwischen der Reizstärke S auf der einen Seite und der Intensität der Reizempfindung E auf der anderen Seite gibt es allerdings eine untere Grenze für die Reizstärke, den Schwellenreiz S_0 , bei dem gerade noch eine Reaktion ausgelöst wird. Ein Beispiel ist die Geruchsschwelle, als Volumenanteil des betreffenden Gases in der Atemluft angegeben. Sowohl für die als Impulsfrequenz meßbare Nervenerregung als auch für die Intensität der subjektiven Empfindung E , für deren Schätzung verschiedene Verfahren existieren, ergibt sich eine allgemeine Relation, das Potenzgesetz nach STEVENS

$$E = k \cdot (S - S_0)^n$$

mit einer Konstanten k und dem für die verschiedenen Reizqualitäten typischen Exponenten n .

In logarithmischer Form:

$$\log E = n \cdot \log(S - S_0) + K$$

Die Darstellung in einem zweifach logarithmischen Koordinatensystem ergibt Geraden, deren Steigung für Lichtreize verhältnismäßig klein ($n < 0,3$) ist. Für Geruchsstoffe liegt n bei 0,5, für bestimmte Schmerzreize ist $n > 1$. Eines der Schätzverfahren für die subjektive Empfindung zählt die Anzahl der Kontrastschwellen zwischen einem Standard- oder Schwellenreiz und der zu beurteilenden Reizstärke. Aus der Beobachtung, daß für die Stufen des Unterscheidungsvermögens ΔE die zugehörigen Stufen der Reizstärke ΔS mit zunehmender Reizintensität S anwachsen, wurde von WEBER die Regel formuliert

$$\Delta E = k \cdot \Delta S/S.$$

Ihre Verallgemeinerung zu

$$E = K \cdot \log S/S_0$$

hat als Weber-Fechnersches Gesetz oder Psycho-physisches Grundgesetz Allgemeingültigkeit beansprucht. Im Gegensatz zur neueren Stevens-Funktion eignet sie sich jedoch nur für einen begrenzten Bereich zur Beschreibung der Relation Reizstärke/Empfindung. Die Annahme einer Kontrastschwelle $\Delta S/S = 0,02$ für die Unterscheidung der Helligkeit ist z. B. in der Definition der meteorologischen Beobachtungsgröße „Sichtweite“ enthalten. Ebenfalls in der Meteorologie ist die Beschreibung einer Beziehung — zwischen Windgeschwindigkeit und Höhe — mit einem Potenz- oder einem logarithmischen Ansatz geläufig.

Die Relation Reizstärke/Reizempfindung wird durch die räumliche und zeitliche Struktur der angebotenen Reize in weiten Grenzen variiert. Für kleine Flächen F der Ausdehnung oder für eine sehr kurze Andauer t eines bestimmten Reizes (etwa $t < 0,1$ s beim Sehvorgang) ist der Schwellenreiz $S_0 \sim 1/F, \sim 1/t$; d. h. die Schwelle wird mit der Ausdehnung des Reizgebietes / der Reizdauer erniedrigt. Das Produkt $S_0 \cdot F$ bzw. $S_0 \cdot t$ entspricht einer konstanten Reizdosis. Für eine größere Reizdauer, im Bereich von Sekunden oder Minuten, wird die Schwelle S_0 heraufgesetzt und die Empfindungsstärke E dadurch verkleinert, wobei allerdings im Bereich oberhalb der neuen Schwelle die Höhe der unterscheidbaren Reizstufen ΔS kleiner, das Auflösungsvermögen verbessert wird (Abb. 1). Die Zeit, in der nach einer sprunghaften Änderung der Reiz-

stärke ein neues Niveau der Empfindung annähernd erreicht wird, dauert bei der sogenannten Helladaptation des Auges weniger als eine Minute, bei Geruchsreizen einige Minuten, bei der Temperaturempfindung ebenso wie bei der Dunkeladaptation einige zehn Minuten. Der Schmerz oder der Hunger kennt allerdings keine Adaptation. Die Wirkungen einer Adaptation beschränken sich nicht auf die Empfindung oder bewußte Wahrnehmung von Reizen, sie erfassen das ganze Verhalten, auch die vegetativen Reaktionen.

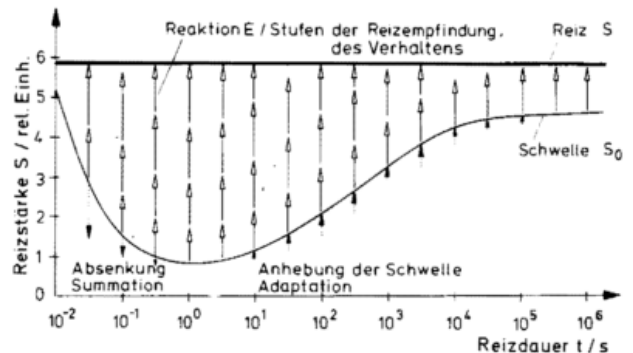


Abb. 1: Beispiel für einen typischen Zeitverlauf der Relation Reiz/Reaktion.

Die Adaptationszeit grenzt, zusammen mit der Anhebung der Reizschwellen bei sehr kurzer Reizdauer einen Zeitbereich, etwa zwischen Bruchteilen einer Sekunde und mehreren Minuten ein, in dem ablaufende Änderungen der Reizstärke die größten Reaktionen auslösen. Neben der relativ schnellen sensorischen Adaptation laufen langsamere Prozesse der Anpassung an sich ändernde äußere Bedingungen ab, die beim Einzelnen bis zu Jahren dauern können. Hierher gehört auch der historisch gewachsene Begriff der Akklimatisation, der eine Anpassung an geänderte Klimabedingungen bezeichnet. Bei einer Population reicht die genetische Anpassung über viele Generationen.

Ein wesentliches Ziel der verschieden schnellen Reaktionen auf Reize, auch der Anpassungsprozesse, ist die Erhaltung eines möglichst gleichbleibenden Zustands im inneren Milieu des Körpers, wie sie für den Ablauf der Lebensvorgänge auf einer höheren Entwicklungsstufe notwendig ist. Am Beispiel der thermischen Bedingungen wird im Beitrag 7 gezeigt, wie dieses Prinzip der Homöostase in einem sehr veränderlichen äußeren Milieu verwirklicht wird. Es liegt nahe, wie das hier zum Teil auch geschehen ist, auf diese Vorgänge Begriffe und Betrachtungsweisen anzuwenden, die in der Nachrichten- und der Regeltechnik entstanden sind und durch die Biokybernetik auf biologische Systeme übertragen werden.

4 Typische extreme Kombinationen meteorologischer Reize

Die verschiedenen Klimate der Erde enthalten ein nach der Intensität und der Qualität sehr gegensätzlich ausgeprägtes Angebot meteorologischer Reize. Klassische Klimadefinitionen stellen die unmittelbar auf den Menschen wirkenden Eigenschaften durchaus in den Vordergrund, wie z. B. der Anfang der häufig zitierten Definition von A. von HUMBOLDT zeigt: „Der Ausdruck Klima bezeichnet in seinem allgemeinen Sinne alle Veränderungen in der Atmosphäre, die unsere Sinne merklich affizieren . . .“.

Die gängigen an den Auswirkungen orientierten Einteilungen der Klimate jedoch richten sich vorwiegend nach der Verfügbarkeit der Beobachtungsdaten und den Wirkungen auf die für eine Unterteilung besser geeignete natürliche Vegetation. Die im Vergleich zu den meisten höheren Pflanzen weniger empfindliche Reaktion des Menschen auf Abstufungen der Klimate (als Art und als Individuum) erlaubt zunächst eine grobe Einteilung nach drei Faktoren, die ein Klima vorherrschend bestimmen: Die geographische Breite, die Lage zum Meer und die Höhenlage. Aus den Gegensatzpaaren Äquatorial/Polare, Maritim/Kontinental und Tiefland/Hochgebirge lassen sich $2^3 = 8$ Kombinationen gegensätzlicher Einflüsse bilden, die jedoch wegen der z. T. vorhandenen Abhängigkeiten zwischen den drei Faktoren unterschiedlich extreme Verhältnisse darstellen. Zum Beispiel wachsen die den Grad der Kontinentalität kennzeichnenden Temperaturamplituden mit der geographischen Breite an; die Abnahme der Mitteltemperaturen mit der Höhe kompensiert zum Teil die Eigenschaften des äquatorialen Klimas und verschärft diejenigen des polaren Klimas. Besonders herausragende extreme Klimate, auch in ihrer praktischen Bedeutung, sind das äquatoriale oder tropische Tieflandklima, das tropische Wüstenklima, das Hochgebirgsklima und das Polarklima.

Das Hochgebirge bietet in einigen 1000 m Höhe einen Klimastreß, das heißt Reize in einer Intensität, deren Wirkung durch entsprechende Reaktionen kaum mehr ausgeglichen werden kann, die demnach die Aufrechterhaltung der Homöostase gefährden. Schon in Zonen unterhalb 1000 m, die bei uns außerhalb der Alpen noch zum Mittelgebirge gerechnet werden, beginnt die Ausprägung einer typischen Reizkombination. Derartige Höhen sind leicht und schnell erreichbar, auch ohne moderne Verkehrsmittel. Nicht zuletzt wegen ihrer Bedeutung für Kuraufenthalte, als Urlaubsziel allgemein und für den Wintersport sind die klimatischen Eigenheiten und die Auswirkungen auf den Menschen Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen. Besonders die im Alpenraum durchgeführten Studien haben wesentlich zur Entwicklung der Bioklimatologie überhaupt beigetragen.

Das Höhen- oder Hochgebirgsklima soll deshalb hier als Beispiel für eine extreme Reizkombination dienen. Wesentliche Eigenschaften im Vergleich zum Klima des Tieflands sind:

- Die mit der Abnahme des Luftdrucks verbundene Abnahme des Sauerstoffdrucks (bei 3000 m um etwa 30%)
- Die im Mittel um etwa 6 K je 1000 m erniedrigten Lufttemperaturen
- Die damit im Zusammenhang stehende Verminderung des Wasserdampfgehalts, die etwas geringer ist als in der freien Atmosphäre.
- Die erhöhte Intensität der Sonnenstrahlung, insbesondere des kurzwelligen Anteils. Für einen alpinen Bereich kann eine mittlere Erhöhung der Globalstrahlung um 30% in 3000 m Höhe angenommen werden.

Dazu kommt noch eine Reihe weiterer Abwandlungen:

Noch stärker als der Wasserdampfgehalt geht die Konzentration der Aerosolpartikel zurück und zwar in 3000 m Höhe auf etwa 10 bis 20% der Werte im Tiefland. Andere Klimatelemente wie die Windgeschwindigkeit werden von den orographischen Bedingungen mehr beeinflusst als von der Höhenlage selbst. Die in mittleren Breiten in der freien Atmosphäre vor-

handene Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe wird sich allerdings in Gipfellenen durchsetzen. Typisch für mitteleuropäische Verhältnisse ist eine Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit von etwa 2,5 m/s im küstenfernen Flachland auf 7 m/s bei einer Bergstation in 3000 m Höhe — im Vergleich zu etwa 10 m/s in der freien Atmosphäre in derselben Höhe. Bioklimatisch von größerer Bedeutung als diese Erhöhung der mittleren Geschwindigkeiten sind die orographisch bedingten und lokal sehr verschieden ausgeprägten Strömungserscheinungen und Windsysteme. Den ersten Platz nimmt der bei geeigneten synoptischen Situationen auf der Leeseite einer Gebirgskette auftretende Föhn ein, der hier die atmosphärischen Bedingungen insgesamt drastisch verändert, insbesondere die Temperatur ansteigen läßt und die Luftfeuchte absenkt. Daneben wird das Lokalklima im Gebirge von den thermisch bedingten, in einem kleineren Maßstab mit einer tageszeitlichen Periodik ablaufenden Hang-, Berg- und Talwinden beeinflusst.

Von den genannten Eigenschaften des Höhenklimas zeigt die Luftdruckabnahme und der damit verbundene Rückgang des Sauerstoffgehalts die strengste Höhenabhängigkeit. Im Vergleich zur Höhenänderung des Luftdrucks ist seine zeitliche Variation aufgrund der wandernden Luftdruckgebilde mit einer Spannweite von etwa 60 mbar relativ klein. Unmittelbare Wirkungen dieser Druckänderungen auf das körperliche Befinden sind nicht nachgewiesen. Vorhandene Korrelationen deuten auf mittelbare Wirkungen, da Druckänderungen mit allgemeinen Wetteränderungen einhergehen. Ein direkter Einfluß von annähernd periodischen Druckschwankungen, im Zeitbereich von einigen Minuten bis einigen 10 Minuten, wie sie beim Föhn auftreten — als Folge der Scherungswellen an der Obergrenze einer am Boden aufliegenden Kaltluftschicht — wird allerdings für möglich gehalten (RICHNER, 1978).

Unmittelbare Wirkungen der Druckänderung mit der Höhe treten bei einem schnellen Höhenübergang, z. B. im Fahrstuhl, im Auto, in der Seilbahn, im Flugzeug auf, als Folge des unvollständigen Druckausgleichs von Körperhöhlen, wie z. B. dem Mittelohr. Sie können hier außer Betracht bleiben.

Wichtiger sind die Wirkungen des verminderten Sauerstoffangebots. Der Partialdruck des Sauerstoffs in der eingeatmeten Luft, innerhalb der Lungenbläschen (Alveolen) ist gegenüber dem der Außenluft erniedrigt. Ein Grund ist die Erhöhung des Wasserdampfdrucks auf den Sättigungswert bei Körpertemperatur (63 mbar). Eine weitere, noch stärkere Herabsetzung ergibt sich durch die Vermischung mit der Restluft, als Folge des unvollständigen Luftaustausches bei der Atmung. Trotzdem kann eine Beziehung hergestellt werden zwischen dem äußeren Luftdruck bzw. Sauerstoffdruck und der Sauerstoffsättigung im arteriellen Blut. Diese nimmt zunächst mit abnehmendem Außendruck nur sehr langsam und dann zunehmend schneller ab; bis 3000 m Höhe um etwa 6%, in 5000 m bereits um 20%. Auch schon die gering erscheinende Verminderung des Sauerstoffangebots im Blut um wenige Prozent kann die Versorgung des Gewebes beeinträchtigen, da sie im Vergleich zur Sauerstoffsättigung im venösen Blut gesehen werden muß, die im Ruhezustand etwa um 25% unter der des arteriellen Blutes liegt. Als Folge des oberhalb etwa 3000 m deutlich schneller werdenden Abfalls der Sauerstoffsättigung des Blutes ist nicht auszuschließen, daß in diesen Höhen auch wetterbedingte Druckschwankungen, wie sie in mittleren Brei-

ten vorkommen, die Sauerstoffversorgung beeinflussen (JUNGMANN, 1971).

Die Reaktionen auf den Sauerstoffmangel erstrecken sich über eine Zeitskala von Minuten bis zu Monaten. Die damit verbundenen Prozesse der Anpassung, der Höhenakklimatisation, ermöglichen bei einem langsamen oder stufenweisen Übergang eine annähernde Erhaltung der körperlichen Leistungsfähigkeit bis in große Höhen.

Eine augenblicklich einsetzende Reaktion, an deren Auslösung wohl innere Chemorezeptoren beteiligt sind, ist die Intensivierung der Atmung, die den Abfall des Sauerstoffdrucks in den Lungenbläschen vermindert. Zusammen mit einer allgemeinen Steigerung der Durchblutung wird so die Sauerstoffversorgung des Gewebes aufrecht erhalten. Eine langsamere, über einige Wochen ablaufende Reaktion, ist die Vermehrung des Blutfarbstoffs Hämoglobin und der Zahl der roten Blutkörperchen, mit der eine Verbesserung der Transportkapazität des Blutes erreicht wird. Damit kann die anfangs gesteigerte Herzaktivität wieder normalisiert werden. Im Zusammenhang mit der zuerst genannten Intensivierung der Atmung steht eine sehr langsame Reaktion, die Vergrößerung des Brustkorbs und des Lungenvolumens. Diese bei Höhenbewohnern zu beobachtenden Eigenheiten des Körperbaus werden z. T. als das Ergebnis einer genetischen Anpassung gedeutet.

Insgesamt werden die Reaktionen auf den Höhenreiz durch seine anderen Komponenten, die kältere, trockene Luft und die intensivere Strahlung mitgeprägt. Z. B. kann die erhöhte Wasserdampfabgabe über die Atmung durch die Austrocknung der Atemwege ebenso wie eine starke Abkühlung eine Intensivierung der Atmung behindern. Die besonders im Winter im Vergleich zum Tiefland erhöhte Lichtintensität wirkt über das Auge anregend auf das Zentralnervensystem und damit auf das Gesamtbefinden (HOLLWICH, 1977). Durch die Reizkombination des Höhenklimas werden Reaktionsmechanismen im Körper ausgelöst und durchgespielt, deren Einübung eine nachhaltige Wirkung auf den Organismus als Ganzes hat. Insbesondere wird die Funktion der autonomen Regelmechanismen erweitert und verbessert, die Abwehrkräfte gegen Krankheitserreger werden gesteigert. In der Klimatherapie lassen sich die abgestuften Intensitäten der Höhenklimate, etwa zwischen 700 m und 2000 m, abhängig von der Ausgangslage des Einzelnen, dosiert als Heilmittel anwenden. Die

große Zahl der Urlauber setzt sich allerdings diesen Klimareizen ziemlich ungezielt aus und geht dabei das Risiko ein, daß z. B. Krankheiten in einem akuterem Stadium einen dramatischen Verlauf nehmen.

Für den Bergsteiger in großer Höhe — auch für Sportveranstaltungen in hochgelegenen Austragungsorten trifft zu, daß der Sauerstoffmangel als begrenzender Faktor den Einfluß der anderen Klimaelemente überwiegt (JUNGMANN, 1971). Für die Besiedlung hochgelegener Regionen jedoch wird durch die Anpassung die Rolle des Sauerstoffmangels verkleinert, als begrenzende Faktoren treten die Kälte, die Schneebedeckung, die erschwerte Versorgung mit Nahrungsmitteln in den Vordergrund (BARRY, 1981).

Literatur

- BARRY, R. G.: Mountain weather and climate. London: Methuen 1981.
- FLACH, E.: Human Bioclimatology. In: H. E. LANDSBERG, World Survey of Climatology. Vol. 3, Amsterdam 1981.
- HÖSCHELE, K.: Der Menschliche Wärmehaushalt bei vermindertem Luftdruck. Preprints Kongreß „Neue Errungenschaften der Biometeorologie und praktische Anwendungen der natürlichen und künstlich erzeugten Höhenverhältnisse“. Ancona 1976.
- HOLLWICH, F.; B. DIECKHUES; B. SCHRAMEYER: Die Wirkung des natürlichen und künstlichen Lichtes über das Auge auf den Hormon- und Stoffwechselhaushalt des Menschen. Klin. Mbl. Augenheilk. 171 (1977) S. 98—104
- JUNGMANN, H.: Zur Bioklimatologie des Hochgebirges unter besonderer Berücksichtigung des verminderten Luftdrucks. Z. Phys. Med. 1 (1971) S. 40—47
- RICHTNER, H.: Zusammenhänge zwischen raschen atmosphärischen Druckschwankungen, Wetterlage und subjektivem Befinden. LAPETH-8, Zürich 1974/1978.
- SCHMIDT, R. F.; G. THEWS (Hrsg.): Physiologie des Menschen. 19. Aufl. Berlin 1977.
- TROMP, S. W. (Hrsg.): Progress in Human Biometeorology. Amsterdam 1974.
- TROMP, S. W.: Biometeorology. London 1980.

7

G. JENDRITZKY, Freiburg i. Br.

Zum thermischen Wirkungskomplex des Menschen

1 Einführung

Die Auswirkungen der thermischen Umweltbedingungen auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen sind ein vertrauter Bestandteil unserer täglichen Erfahrung. Trotzdem ist der übliche Sprachgebrauch bei Begriffen wie Wärme, Kälte zur Beschreibung der Wechselwirkung mit der Umgebung unzuverlässig. So wird ein Mensch beim Be-

rühren gleichtemperierter Flächen mit unterschiedlichen Wärmeleitungsseigenschaften wohl kaum unterschiedliche Wärme-flüsse konstatieren, sondern unterschiedliche Temperaturen. Dieses Beispiel zeigt ferner, daß Transportmechanismen beim Energieaustausch nicht nur bei meteorologischen Prozessen eine Rolle spielen; sie sind auch unentbehrlich bei der Auseinandersetzung des Organismus mit seiner physikalischen Umwelt.

Die Beschreibung der thermischen Umgebungsverhältnisse des Menschen in einer physiologisch relevanten Form stellt eines der Hauptprobleme der Humanbiometeorologie dar. In der Literatur lassen sich mehr als 100 „Komplexgrößen“, „Indizes“ oder „Klimasummenmaße“ finden, mit denen versucht wurde, die gemeinsame Wirkung der den thermischen Wirkungskomplex bestimmenden meteorologischen Einzel-elemente auf den Menschen abzuschätzen. Weitgehende Simplifizierungen und/oder Vernachlässigungen wesentlicher Einflüsse zwecks bequemer Anwendbarkeit in der Praxis sind charakteristisch für diese Verfahren, deren Vielzahl und häufige Modifikationen auch als Indiz für die Schwierigkeit des Problems der Wechselwirkung Mensch – Atmosphäre im physiologischen wie im meteorologischen Bereich angesehen werden mag.

2 Zur Physiologie der Thermoregulation

Der Mensch besitzt als homoiothermes Lebewesen die Fähigkeit, die Temperatur in seinem Körperinneren (Kerntemperatur, zentrale Bluttemperatur) unabhängig von wechselnden Umgebungsbedingungen und bei unterschiedlicher eigener Stoffwechselleistung (Wärmeproduktion) innerhalb einer geringen Schwankungsbreite konstant zu halten. Dies wird durch eine Reihe von autonomen, d.h. unwillkürlich ablaufenden physikalischen und chemischen Regulationsmechanismen erreicht, mit denen Wärmeabgabe und Wärmebildung aneinander und an die Umweltbedingungen angepaßt werden. Zusätzlich unterstützen bestimmte Verhaltensweisen (Kleidung, Aktivität, Wohnung, Heizung, Aufsuchen von Schatten etc.) die Aufgabe der Thermoregulation.

Homoiothermie bedeutet nun nicht, daß sämtliche Körperstellen die gleiche Temperatur aufweisen müssen. Entsprechend Wärmebildung und -transport im Körper und den thermischen Bedingungen der Umgebung stellt sich vielmehr ein räumlich und zeitlich variables Temperaturfeld ein (Abb. 1). Haut und Extremitäten sind zu der mehr oder weniger poikilothermen Schale zu rechnen, wobei an den Extremitäten nicht nur ein radiales, sondern auch ein axiales Temperaturgefälle herrscht. Das Innere des Rumpfes und der Kopf bilden den eigentlichen homoiothermen Kern, in dem somit die Funktion lebenswichtiger Organe sichergestellt wird. Die Kerntemperatur kann nach HENSEL (1973 (a)) i. a. gut durch die Rektaltemperatur approximiert werden. Sie ist aber keineswegs vollständig konstant, sondern weist über Sollwertverstellung eine exogen synchronisierte 24stündige Periodik auf mit Minimum in den frühen Morgenstunden und Maximum am späten Nachmittag bei interindividuell unterschiedlichen Schwankungsbreiten um 1.5 K.

2.1 Die Steuerung der Thermoregulation

Im Regelkreis des Thermoregulationssystems (Abb. 2) stellt die Kerntemperatur die wichtigste Eingangsgröße dar. Abweichungen vom „Sollwert“ beeinflussen die vorwiegend im Zwischenhirn (Hypothalamus) gelegenen Temperaturregelungszentren, die selbst auch als Temperaturfühler funktionieren. Äußere Kalt- und Warmrezeptoren in der Haut senden auf dem Nervenwege Temperaturinformationen aus der Körperschale direkt an die zentralen Regelungszentren. Mit dieser Umgehung der thermischen Trägheit aufgrund der großen

Wärmekapazität des Körpers können im Zentrum Reaktionen ausgelöst werden, noch bevor sich die Regelgröße Kerntemperatur geändert hat. Die periphere „Störgröße“ wirkt also

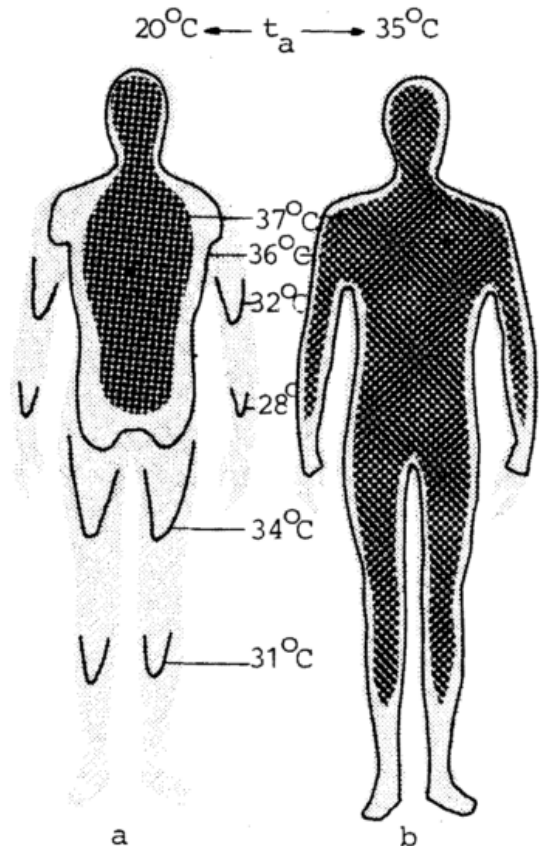


Abb. 1: Isothermen in der Körperschale (stark schematisiert) bei verschieden hoher Raumtemperatur t_a (nach ASCHOFF und WEVER, 1958).

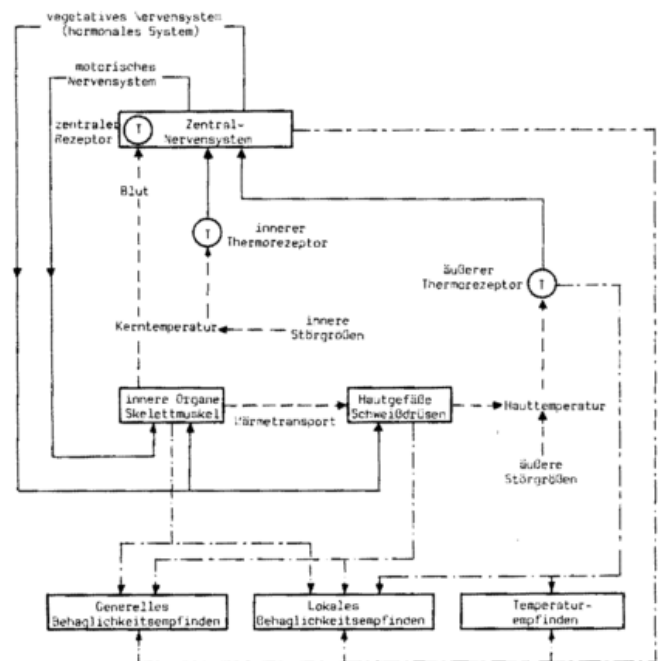


Abb. 2: Schema der menschlichen Thermoregulation mit Anbindung von Empfindungsqualitäten (nach HENSEL, 1973 (a) (b)).

gleichzeitig als Führungsgröße (Störgrößenaufschaltung). Die äußeren Thermorezeptoren sprechen nicht nur auf absolute Temperaturen, sondern auch auf deren zeitliche Änderungen an (PD-Übertragungsfunktion), wodurch ein besonders schnelles, teilweise sogar überschießendes Reagieren auf Änderungen bei den Umgebungsbedingungen erreicht wird. Obwohl innere wie äußere Temperaturfühler sowohl auf Erwärmung als auch auf Abkühlung ansprechen, werden Regulationen gegen Abkühlung hauptsächlich von den äußeren (Hauttemperatur), gegen Erwärmung vorwiegend von den inneren Rezeptoren (Kerntemperatur) ausgelöst (HENSEL, 1973 (a)).

Zur Kompensation von Temperaturstörungen setzen die Regulationszentren auf neuralem und hormonalem Weg verschiedene Stellglieder ein. Bei nur geringen Abweichungen von neutralen thermischen Bedingungen erfolgt die Regelung vorwiegend vasomotorisch, d.h. über Änderungen der peripheren Durchblutung (kutane Vasokonstriktion bzw. Vasodilatation) wird der Wärmetransport vom Kern zur Schale gesteuert. Aber auch unter extremer Wärme- oder Kältebelastung trägt dieser Mechanismus zur Wärmeregulation bei, denn darüber ist eine Veränderung der konvektiven Wärmeflüsse bis um den Faktor 7 (bezogen auf die gesamte Schale) möglich (HENSEL, 1973 (a)). Bei den Extremitäten und hier insbesondere bei den langgestreckten zylindrischen Formen der Finger mit ihren im Vergleich zum Volumen großen Oberflächen können nach HENSEL (1973 (a)) Variationen in der Durchblutung um den Faktor 600 auftreten. In Kälte werden die Wärmeverluste noch dadurch verringert, daß im Gegenstrom-Wärmeaustausch-Prinzip zwischen den großen Arterien und ihren Begleitvenen das Blut vorgekühlt wird.

Zusätzlich zu dieser vasomotorischen Regelung erfolgt bei Kälte eine Zunahme der Wärmebildung (chemische Temperaturregulation) über Steigerung des Muskeltonus, Kältezittern und zitterfreie Thermogenese (Abb. 3), die nach WENZEL (1982) das Sechsfache des Grundumsatzes (= minimaler Energieumsatz in Ruhe unter thermisch neutralen Bedingungen und ohne stoffwechselsteigernde Ernährung) erreichen kann. Die „Gänsehaut“ ist nichts anderes als die Kontraktion kleinster Hautmuskeln (Haarbalgmuskeln); ein Effekt auf den Wärmeaustausch mit der Umgebung durch die Verdickung der Grenzschicht an der Körperoberfläche dürfte aber aufgrund der im Vergleich zu Tieren i. a. geringen Behaarung des Menschen klein sein.

Zur Auslösung der zentralnervösen Steuerung von Wärmebildung und Vasokonstriktion signalisieren die in der Haut befindlichen Kaltrezeptoren über afferente Nerven die äußere Abkühlung (äußere Störgröße) an die Thermoregulationszentren. Die Verringerung der peripheren Durchblutung läßt die Temperatur der Körperschale absinken. Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Gewebes bleibt der Wärmefluß auch bei zunehmender Temperaturdifferenz Kern-Schale im Vergleich zum konvektiven über die Blutbahnen klein. Die Hauttemperatur nähert sich den tiefen Umgebungstemperaturen (Abb. 3) und damit erhöht sich natürlich auch der Erregungszustand der Kaltrezeptoren. Da die Zentren außerdem die Funktion von Temperaturfühlern besitzen, wird ihr Erregungszustand zusätzlich von der Kerntemperatur direkt beeinflusst (Ist-Sollwert-Vergleich) und stellt demnach eine integrative Größe dar (HENSEL, 1973 (b)).

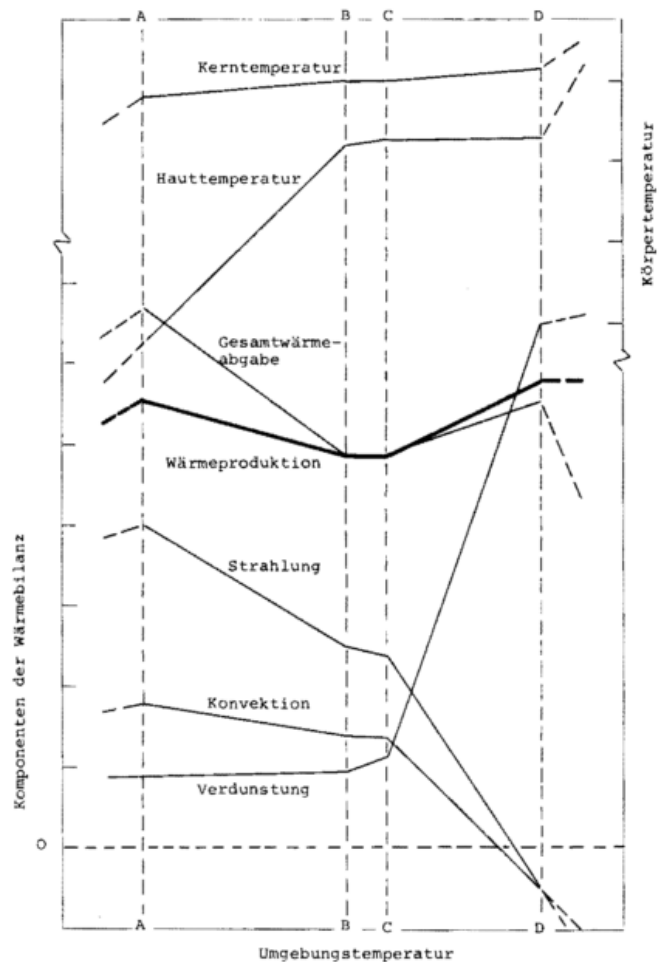


Abb. 3: Beziehungen von Komponenten der Wärmebilanz und von Körpertemperaturen zu den thermischen Umgebungsbedingungen (stark schematisiert, unter Verwendung von ASCHOFF, 1971 und MOUNT, 1974).

- A Temperatur für zunehmende Hypothermie
- AD Bereich der Thermoregulation
- BC Bereich metabolischer Neutralität, minimale Aktivität der Thermoregulationsmechanismen
- AB Regulation bei Kälte
- CD Regulation bei Wärme
- D Temperatur für zunehmende Hyperthermie

2.2 Rolle der Transpiration für die Thermoregulation

Unter warmen Bedingungen steigt über Vasodilatation die Durchblutung der Körperschale und damit auch die Hauttemperatur an. Damit werden die Möglichkeiten der Wärmeabgabe an die Umgebung durch Konvektion und Abstrahlung verbessert. Für einen wirksamen Wärmefluß vom Körperkern zur Schale sollte aber die Hauttemperatur möglichst niedrig gehalten werden. Hierzu dient die Bildung von Schweiß in den Schweißdrüsen der Haut, der auf der Hautoberfläche verdunstet, ihr Verdampfungswärme entzieht und damit kühlt. Dieser Mechanismus ist eine wesentliche Voraussetzung zur Wärmeabgabe bei Lufttemperaturen in der Nähe der Körpertemperatur oder darüber (Abb. 3).

Die Schweißproduktion wird nicht nur mit steigender Wärmebelastung der Umgebung größer, sondern überproportional auch mit zunehmendem Energieumsatz (die bei äußerer Abkühlung benötigte „Stellgröße“ Wärmebildung ist nun „Stör-

größe“). Die Produktion von Schweiß erleichtert also die Aufgaben des Kreislaufs zur Deckung des steigenden Blutbedarfs der Muskulatur, weil die Abnahme der Hauttemperatur das Temperaturgefälle Kern-Schale vergrößert und damit die Wärmeabgabe bei geringerer Vasodilatation verbessert. Deshalb wird während körperlicher Arbeit selbst in unbehaglich kalter Umgebung Schweiß gebildet (WENZEL, 1982).

Die Menge des von den Schweißdrüsen produzierbaren Schweißes hängt bei ausgeprägten interindividuellen Unterschieden von der Dauer der Hitzeexposition ab. Als Maximalwerte werden 4 l bei einstündiger, 1 l/h bei sechsständiger und 0,5 l/h bei 12ständiger Belastung angenommen. Bei Behinderung der Verdunstungsmöglichkeiten führt der auf der Hautoberfläche haftende Schweiß allmählich zu einer Einschränkung der Sekretion (Schweißdrüsenermüdung), wodurch der Organismus nicht mehr hinreichend gekühlt wird. Die Verringerung des Temperaturgefälles erfordert eine verstärkte Hautdurchblutung und die damit verbundene deutliche Zunahme der Herzfrequenz ist Indikator für die Belastung des Blutkreislaufes. Die gesteigerten Anforderungen an das Herzkreislaufsystem bedingen einen leicht verstärkten Stoffwechsel auch unter warmen Bedingungen (Abb. 3).

Bei ungenügender Entwärmung steigt trotz maximal arbeitender Stellglieder im Regelkreis die Körpertemperatur an. Ab 40°C tritt die Gefahr des Hitzekollaps durch Blutdruckabfall auf, weil infolge der starken Erweiterung der Hautgefäße (Vasodilatation) ein Mißverhältnis zwischen zirkulierender Blutmenge und Gefäßkapazität entsteht. Die beiden Regelkreise für Blutdruck und Kerntemperatur sind „vermascht“ und in Konkurrenzsituationen unterliegen die gefäßverengenden Impulse der Blutdruckregelung den gefäßweiternden der Thermoregulation. Unter Hitzschlag ist eine direkte Schädigung des Organismus durch die hohe Kerntemperatur zu verstehen, wobei die Letaltemperatur bei etwa 43°C liegen dürfte. Wie gut der Mensch jedoch auf eine Anpassung an Hitze vorbereitet ist, zeigt die Tatsache, daß in trockener Luft, wenn der gebildete Schweiß vollständig auf der Hautoberfläche verdunstet und nicht etwa wirkungslos abtropft, ein Daueraufenthalt bis zu Lufttemperaturen von etwa $t_a = 60^\circ\text{C}$ möglich ist und $t_a = 120^\circ\text{C}$ eine Viertelstunde ertragen werden. HENSEL (1973 (a)) bezeichnet deshalb den Menschen als tropisches Lebewesen.

Bei starker Auskühlung des Körpers wird der Regelungsbe- reich des Thermoregulationssystems bald unterschritten. Es kommt zu einem Absinken der Kerntemperatur, wodurch sich sämtliche physiologischen Funktionen verlangsamen. Ab etwa 25°C Kerntemperatur besteht die Gefahr von Kammerflimmern und Herzstillstand. In Hypothermie läßt sich aber eine Grenztemperatur für den Kältetod nicht so exakt festlegen wie bei Überwärmung.

2.3 Akklimatisation

Die Erträglichkeit von Hitze und Kälte, die Anpassung an die Änderungen der thermischen Bedingungen mit den Jahreszeiten, läßt sich durch chronische Umstellungen des autonomen Thermoregulationssystems verbessern. Diese in Zeiträumen von Tagen bis Monaten ablaufenden Akklimatisationen bewirken einen ökonomischeren Einsatz der Thermoregulationsmechanismen.

Bei Hitzeakklimatisation findet man eine deutlich gesteigerte Schweißproduktion bis zum Zweifachen und statt profuser Schweißausbrüche eine gleichmäßige Sekretion. Die Elektrolytkonzentration (NaCl) sinkt von anfänglich 0,3% um eine Größenordnung, wodurch sich der Dampfdruck und damit die Verdunstungsmöglichkeit erhöht, und das für die Erhaltung des Blutplasmavolumens wichtige Na eingespart wird. Bei langfristigen Aufenthalt in heißen Klimaten vermehrt sich darüber hinaus die Zahl der aktiven Schweißdrüsen.

Kälteakklimatisation beruht nur geringfügig auf Umstellungen in der Thermoregulation. Das wegen der konvektiven Wärmeverluste unökonomische Kältezittern läßt nach und die zitterfreie Thermogenese in einigen Geweben ohne motorische Innervation der Skelettmuskulatur nimmt zu. Bei Kälteadaptierten setzt die Kältevasokonstriktion zwar schneller ein, aber sie ist auf die Dauer geringer, was die Möglichkeiten zur Arbeit in Kälte verbessert. Der Mensch gewöhnt sich allmählich an Kälte (Habituation) und das subjektive Kälteempfinden geht zurück. Dies ist eine Angelegenheit des Zentralnervensystems, denn die Erregung der peripheren Kaltrezeptoren bleibt erhalten. Im übrigen beruht die Anpassung an Kälte beim Menschen im wesentlichen auf Änderung von Verhaltensweisen. Kälteadaptation tritt je nach den Bedingungen der Kälteeinwirkung in verschiedenen Adaptationsmustern auf. Es besteht außerdem eine Abhängigkeit von Gesundheit — akute Krankheit oder starker Streß kann Kälteadaptation auslösen —, Konstitution, Ernährungszustand, Geschlecht, Lebensalter und von anderen bestehenden Adaptiven (z. B. Trainingszustand).

Ein erreichter Akklimatisationszustand ist nicht auf Dauer stabil. Bei Wegfall des Reizes muß mit einem Rückgang der Umstellungen in Zeiträumen gerechnet werden, die mit denen vergleichbar sind, die zum Aufbau benötigt wurden.

3 Die Wärmebilanz des Menschen

Auch in einem stationären *biologischen* System müssen nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik in einer Bilanz der Energieflüsse die aufgenommenen und abgegebenen Energiemengen einander exakt gleichen. Die im Organismus des Menschen durch den Stoffumsatz M nach Abzug der äußeren mechanischen Leistung gebildete Wärme $H = M(1-\eta)$ wird über Konvektion C , Strahlung R , Verdunstung E_{sw} und Atmung Q_{res} an die Umgebung dissipiert:

$$H = C + R + E_{sw} + Q_{res} + S \quad (1)$$

Der Wärmespeicherterm S ist nur bei Betrachtung instationärer Bedingungen von Bedeutung und der in der Praxis i. a. unbedeutende Term für Wärmeleitung wurde in (1) bereits vernachlässigt. Unter bestimmten Bedingungen, z. B. durch die Wirkung direkter Sonnenstrahlung, kann R eine bedeutende Energiequelle darstellen, mit einem Betrag durchaus über dem Umsatz aus Stoffwechselenergie. Bei Lufttemperaturen oberhalb der Oberflächentemperatur des Menschen ($t_a > t_{cl}$) wirken die konvektiven Flüsse fühlbarer Wärme C ebenfalls als Quelle.

3.1 Die metabolische Rate

Der Energieumsatz des Menschen zeigt eine große Schwankungsbreite in Abhängigkeit von der Aktivität (Tab. 1). Aus-

gehend vom Minimalwert beim Schlaf mit etwa 40 W m^{-2} sind bei maximaler Arbeit durch durchtrainierte Hochleistungssportler nach HARDY (1978) Steigerungen bis auf das 20fache möglich; für einen „normalen“ Menschen ist aber die Annahme eines Faktors von 10–12 für die Steigerungsrate realistischer. Unter Grundumsatzbedingungen (siehe Abschn. 2) reicht die Wärmeproduktion eines erwachsenen Menschen ($\sim 45 \text{ W m}^{-2}$) bereits aus, um in einer Stunde 0,7 Liter Eiswasser zum Kochen zu bringen und ohne Wärmedissipation würde sich der Körper pro Stunde um mehr als 1 K erwärmen.

Tab. 1: Aktivität und Energiestoffwechsel (modifiziert nach FANGER, 1972)

Aktivität		Stoffwechsel	Mech. Wirkungsgrad η	Rel. Windgeschwindigkeit v_r
		$\frac{M}{A_D}$		
		W m^{-2}		ms^{-1}
Schlafen		41	0	0
Ruhen		47	0	0
Sitzen, ruhig		58	0	0
Stehen, entspannt		70	0	0
Gehen in der Ebene	km/h			
	3.2	116	0	0.9
	4.0	140	0	1.1
	4.8	150	0	1.3
	5.6	185	0	1.6
	6.4	220	0	1.8
	8.0	340	0	2.2
aufwärts %-Steigung				
5	1.6	140	0.07	0.4
5	3.2	175	0.10	0.9
5	4.8	230	0.11	1.3
15	1.6	170	0.15	0.4
15	3.2	270	0.19	0.9
25	1.6	210	0.20	0.4
Gymnastik		175–230	0–0.1	0.5–2
Tennis		270	0–0.1	0.5–2

Die gesamte produzierte Wärmemenge eines Menschen hängt deutlich von seiner Masse m ab. Für Betrachtungen des Wärmeaustausches ist aber der Bezug auf die Oberfläche notwendig. Nach Untersuchungen von DUBOIS (1915, zit. n. CAMPPELL, 1977) besteht zwischen Körperoberfläche A_D , Größe h in m und Masse m in kg eines erwachsenen Menschen folgende empirische Beziehung:

$$A_D = 0.203 m^{0.425} h^{0.725} \quad [\text{m}^2] \quad (2)$$

Die Normierung der Wärmeproduktion auf 1 m^2 bewirkt eine weitgehende Eliminierung der durch unterschiedliche Körpermassen bedingten Variabilität. Trotzdem muß davon ausgegangen werden, daß in Abhängigkeit von Lebensalter, Geschlecht und anderen interindividuellen Unterschieden insbesondere bei größerer Leistung Abweichungen von den in Tabelle 1 beispielhaft aufgeführten Umsätzen bis zu $\pm 20\%$ auftreten. In der gleichen Größenordnung liegt nach SPITZER et

al. (1982) z. B. beim Gehen der Einfluß des Schuhwerkes oder des Untergrundes.

Abweichungen von thermisch neutralen Umgebungsbedingungen, dem metabolisch indifferenten Bereich, führen entsprechend Abbildung 3 ebenfalls zu zunehmendem Stoffumsatz, in Wärme durch die größere Leistung des Herz-Kreislaufsystems und (gering) durch die Sekretionsleistung der Schweißdrüsen, in Kälte über die Erhöhung des Muskeltonus, Zittern und zitterfreie Thermogenese M_{shv} (siehe Abschn. 2).

3.2 Der konvektive Wärmefluß

Für den konvektiven Wärmefluß C von der Oberfläche des bekleideten Menschen gilt nach Normierung auf 1 m^2 Oberfläche eines unbekleideten Menschen

$$C = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (3)$$

mit: f_{cl} Vergrößerungsfaktor der Oberfläche durch Bekleidung entsprechend Tabelle 2

h_c Wärmeübergangszahl in $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$

T_{cl} Oberflächentemperatur der Bekleidung in K

T_a Lufttemperatur in K

Gleichung (3) ist mit unterschiedlichen Wärmeübergangszahlen auch Grundlage für die zahlreichen in älterer Literatur benutzten „Abkühlungsgrößen“, wobei statt der Oberflächentemperatur T_{cl} jedoch feste Werte als Körper- oder mittlere Hauttemperatur eingesetzt sind.

Die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl h_c von der Reynoldszahl Re für erzwungene bzw. von der Grashof-Zahl Gr für freie Konvektion über die Nusselt-Zahl wurde im Beitrag von HÖPPE bereits diskutiert. Es ist dabei zu beachten, daß hier ein mittleres h_c benötigt wird, mit dem unterschiedliche charakteristische Dimensionen von $d = 0.01 \text{ m}$ (Finger, Zehen) bis zu $d = 0.3 \text{ m}$ (Rumpf) zu berücksichtigen sind. NISHI (1978) hält bei erzwungener Konvektion — mit einem Minimalwert von $3.0 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ — folgenden Ansatz für ein mittleres h_c für geeignet (v in ms^{-1}):

$$h_c = 8.6 v^{0.513} \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}] \quad (4)$$

Aus Gleichung (4) folgt, daß bei geringer Luftbewegung kleine Änderungen von v bereits eine relativ große Wirkung auf die Wärmeabgabe besitzen, während mit zunehmender Windgeschwindigkeit h_c immer weniger empfindlich reagiert. Es bedarf keiner besonderen Begründung, daß die „meteorologische“ Windgeschwindigkeit auf eine für den Menschen repräsentative Höhe (etwa 1 m) zu reduzieren ist und dann vektoriell zu der jeweiligen relativen Windgeschwindigkeit v_r aus Tabelle 1 addiert werden muß.

3.3 Der aktinische Energiefluß

Die Anteile der Strahlung am Fluß fühlbarer Wärme lassen sich analog zu Gleichung (3) schreiben:

$$R = f_{cl} h_r (T_{cl} - T_{mrr}) \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (5)$$

Dabei bedeutet h_r die linearisierte Übergangszahl für Strahlungswärme.

$$h_r = f_{eff} \epsilon_p \sigma (T_{cl}^4 - T_{mrr}^4) / (T_{cl} - T_{mrr}) \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}] \quad (6)$$

mit: ϵ_p Emissionskoeffizient der Oberfläche (~ 0.95)

f_{eff} der am Strahlungsaustausch mit der Umgebung beteiligte Bruchteil der Oberfläche (~ 0.7)

σ die Stefan-Boltzmann-Konstante ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T_{mrt} mittlere Strahlungstemperatur, das ist diejenige einheitliche Temperatur einer schwarzstrahlenden Umgebung, bei der der gleiche Wärmeverlust oder -gewinn auftritt, wie unter den konkret betrachteten Bedingungen.

Zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} , mit der die einzelnen Komponenten der Strahlungsflüsse auf die besondere Geometrie des Menschen bezogen werden, müssen sämtliche strahlenden Oberflächen der Umgebung des Menschen bezüglich ihrer Ausdehnung, Orientierung und Entfernung gewichtet werden (JENDRITZKY, 1981). Dies wird durch Winkelfaktoren F_{p-i} erreicht, deren Bestimmung aus den Diagrammen in Abbildung 4 erfolgen kann. Danach ergibt sich der Winkelfaktor zwischen einer Person und der i -ten Fläche, z. B. der dunklen Fläche am Boden mit $a = 5 \text{ m}$, $b = c = 1 \text{ m}$ zu $F_{p-i} = 0.05$. Für den Spezialfall, daß die betrachtete Person sich auf einer großen ebenen Fläche ohne Horizont-einschränkung befindet, stellt der Boden den unteren und der Himmel den oberen Halbraum dar; beide Winkelfaktoren besitzen dann den Wert 0.5.

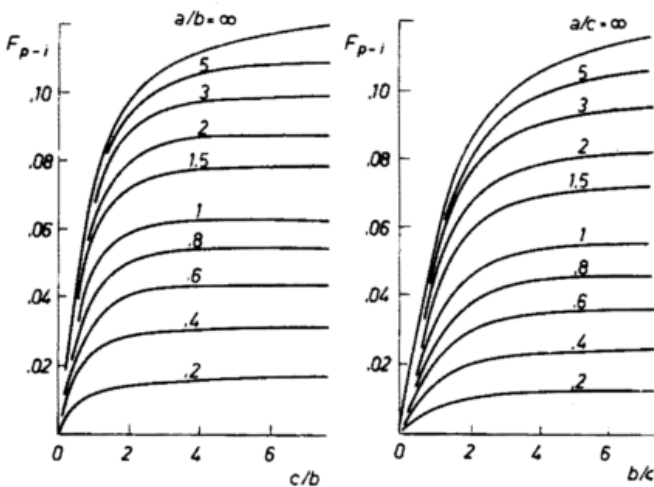
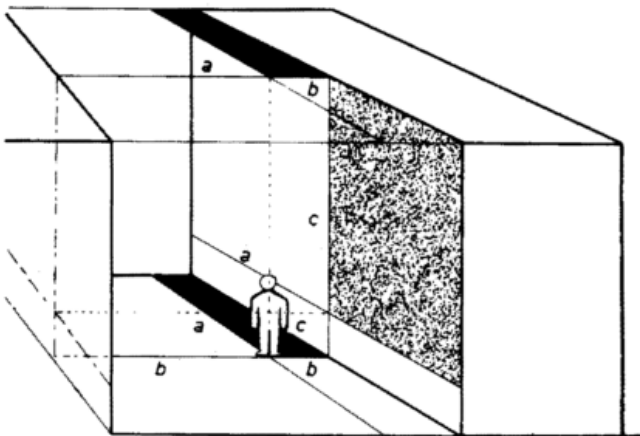


Abb. 4: Bestimmung der Winkelfaktoren F_{p-i} in einer Straßenschlucht. Linkes Diagramm für vertikale, rechtes für horizontale Flächen (nach JENDRITZKY und NÜBLER, 1981).

Für die mittlere Strahlungstemperatur gilt nun:

$$T_{\text{mrt}}^4 = \sum_i \epsilon_i F_{p-i} T_i^4 \quad [\text{K}^4] \quad (7)$$

wobei die kurzwelligeren Strahlungsflüsse unter Berücksichtigung der Albedo der Oberfläche des Menschen und ggf. reflektierender Oberflächen der Umgebung über das Stefan-Boltzmann-Gesetz ebenfalls in Strahlungstemperaturen umgerechnet werden. In dem Zusammenhang ist bemerkenswert, daß die Albedo der Haut des Negers im Vergleich zu der eines Weißen zwar niedriger ist, letzterer aufgrund der größeren Eindringtiefe der kurzwelligeren Strahlung in die Haut aber trotzdem einen größeren Wärmegewinn erfährt.

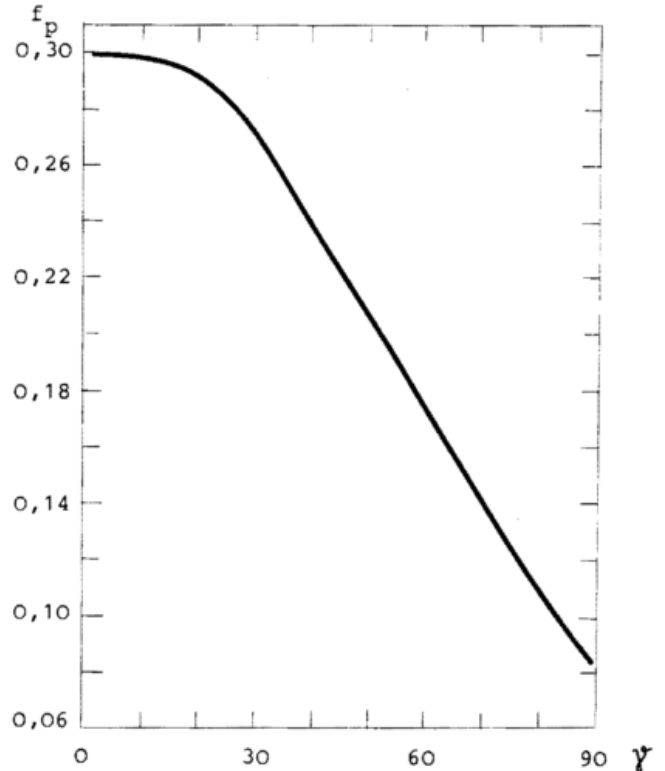


Abb. 5: Projected Area Factor f_p eines aufrecht stehenden rotationssymmetrischen Menschen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ (nach Angaben von FANGER, 1972).

Für den Einfluß von direkter Sonnenstrahlung ist ein Faktor f_p (Projected Area Factor) — das Verhältnis der direkt bestrahlten Fläche zur effektiven Strahlungsoberfläche A_{eff} des Menschen — zu berücksichtigen, der stark von der Haltung des Menschen, seiner Ausrichtung zur Sonne (Azimutwinkel) und der Sonnenhöhe γ abhängt (Abb. 5). Diese von einer horizontalen Empfängerfläche deutlich abweichenden geometrischen Verhältnisse bedingen, daß der maximale Strahlungsgefluß durch direkte Sonnenstrahlung bereits bei $\gamma < 30^\circ$ erreicht wird.

Bei Strahlungswetterbedingungen liegt die mittlere Strahlungstemperatur nachts mehr als 10 K unter der Lufttemperatur und tagsüber bezogen auf einen aufrecht stehenden Menschen um etwa 30 K, bei einem in Normalrichtung zur Sonne exponierten Menschen sogar um mehr als 50 K darüber (JEN-

DRITZKY et al., 1979). Eine vollständige Bedeckung des Himmels mit niedriger Bewölkung reduziert die Abweichung von der Lufttemperatur auf nur wenige Kelvin. In geschlossenen Räumen ohne große Fensterflächen und bedeutende Strahlungsquellen wird T_{mrt} i. a. hinreichend durch die Lufttemperatur approximiert.

Unter der u. a. auch von HÖSCHELE (1970) bei seiner Modellentwicklung gemachten Annahme von Bekleidung und Grenzschicht als einer Anordnung von Widerständen in Serie, durch die sämtliche Wärme von der Hautoberfläche fließt, ergibt sich für den Fluß fühlbarer Wärme:

$$C + R = f_{\text{cl}} F_{\text{cl}} [h_c (T_s - T_a) + h_r (T_s - T_{\text{mrt}})] \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (8)$$

mit: T_s = mittlere Hauttemperatur in K

$$F_{\text{cl}} = 1 / (1 + 0.155 h I_{\text{cl}} f_{\text{cl}})$$

$$h = h_c + h_r, \text{ in } \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

$$I_{\text{cl}} = \text{thermischer Widerstand der Bekleidung in clo-Einheiten (siehe Tab. 2) (1 clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{KW}^{-1})$$

Tab. 2: Wärmeisolation der Bekleidung I_{cl} und Oberflächenvergrößerung f_{cl}
(1 clo = 0.155 $\text{K m}^2 \text{W}^{-1}$)

	I_{cl} (clo)	f_{cl}
Nackt	0.0	1.00
Shorts	0.1	1.00
Freizeitbekleidung mit Shorts	0.3—0.4	1.05
Leichte Sommerkleidung	0.5—0.6	1.10
Korrektor Straßenanzug	1.0	1.15
Anzug und Baumwollmantel	1.5	1.20
Schwerer Anzug und Wintermantel	2.0	1.25
Polarkleidung	3.0—4.0	1.3—1.5

3.4 Der Fluß latenter Wärme

Über die sog. Lewis-Zahl ($2.93 \text{ in } \text{K} \cdot \text{mbar}^{-1}$) kann die Übergangszahl für Verdunstungswärme h_e aus der für fühlbare Wärme h_c bestimmt werden.

$$h_e = 2.93 h_c \quad [\text{W m}^{-2} \text{mbar}^{-1}] \quad (9)$$

Damit erhält man in Analogie zu (8) bei vollständig nasser Hautoberfläche für die maximale Verdunstungskapazität E_{max}

$$E_{\text{max}} = 2.93 h_c f_{\text{cl}} F_{\text{pcl}} (E_s - e) \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (10)$$

mit: $F_{\text{pcl}} = 1 / (1 + 0.143 h_c I_{\text{cl}} f_{\text{cl}})$

$$E_s = \text{Sättigungsdampfdruck bei Hauttemperatur in mbar}$$

$$e = \text{Wasserdampfdruck der Luft in mbar}$$

In F_{pcl} ist der Diffusionswiderstand der Bekleidung für Wasserdampf $1/h_{\text{cl}}$ entsprechend den Angaben von NISHI und GAGGE (1970) durch die für normal poröse Kleidung gültige Beziehung zum thermischen Widerstand I_{cl} berücksichtigt:

$$h_{\text{cl}} = 20.5 / I_{\text{cl}} \quad [\text{W m}^{-2} \text{mbar}^{-1}] \quad (11)$$

Der vollständige Verlust von latenter Wärme E_{sw} von der Haut an die Umgebung setzt sich zusammen aus der Verdunstung des von den Schweißdrüsen aktiv sezernierten Schweißes und dem Anteil, der durch Verdunstung E_{diff} von laufend durch die Haut diffundierenden Wassers erfolgt (perspiratio insensibilis). Unter der Voraussetzung, daß der Diffusionswiderstand der Haut ($m = 4.575 \cdot 10^{-4} \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ mbar}^{-1}$) groß gegen dem üblicher Bekleidung ist, kann die Menge des diffundierten Wassers proportional zur Differenz des Sättigungsdampfdruckes E_s bei Hauttemperatur und des Wasserdampfdruckes e der Luft angesetzt werden und man erhält mit $\lambda = 2.4 \text{ MJ kg}^{-1}$ als Verdampfungswärme von Wasser (bei 34°C):

$$E_{\text{diff}} = 0.31 (E_s - e) \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (12)$$

Der Bruchteil w der Hautoberfläche, der mit Wasser durch reguläres Schwitzen bedeckt ist, ergibt sich nun aus dem Verhältnis des Wärmeverlustes durch Schwitzen E_{rsw} und der Verdunstungskapazität:

$$w = \frac{E_{\text{rsw}}}{E_{\text{max}}} \quad (13)$$

Diffusion ist nur bei nicht nasser Haut möglich, so daß für den Gesamtverlust von latenter Wärme E_{sw} gilt:

$$E_{\text{sw}} = (1-w) E_{\text{diff}} + w E_{\text{max}} \quad (14)$$

Unter kalten bis thermisch neutralen Bedingungen, wenn noch keine Schweißproduktion eingesetzt hat, wird von GAGGE et al. (1970) die Größe von E_{diff} mit 6% von E_{max} angenähert, womit sich Gleichung (14) folgendermaßen vereinfachen läßt:

$$E_{\text{sw}} = (0.06 + 0.94 w) E_{\text{max}} \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (15)$$

3.5 Der Wärmefluß in die Atemluft

Neben dem bisher besprochen trockenen und latenten Wärmeaustausch ($C + R + E_{\text{sw}}$) zwischen der Oberfläche des Menschen und seiner Umgebung treten zusätzlich durch die Atmung Wärmeverluste Q_{res} auf. Die eingeatmete Luft wird im Respirationstrakt auf Körperinnentemperatur erwärmt und mit Wasserdampf gesättigt. Obwohl bei der Ausatmung die oberen Atemwege durch Abkühlung und teilweise Rekondensation des Wasserdampfes an den Schleimhäuten für eine gewisse Rückführung von Energie an den Körper sorgen, liegt die Temperatur der Ausatemluft t_{ex} über der Lufttemperatur t_a . HÖPPE (1981) hat bei Nasenatmung zwischen beiden im Bereich von $-5^\circ \text{C} \leq t_a \leq 30^\circ \text{C}$ eine näherungsweise lineare Beziehung gefunden:

$$t_{\text{ex}} = 0.35 t_a + 25.0 \quad [^\circ \text{C}] \quad (16)$$

Daraus ergibt sich der Verlust an fühlbarer Wärme zu:

$$C_{\text{res}} = V c_p (t_{\text{ex}} - t_a) = 0.0014 M (25 - 0.65 t_a) \quad [\text{W}] \quad (17)$$

Dabei bedeutet V die Ventilationsrate in kg h^{-1} , die im wesentlichen vom Stoffumsatz nach $V = 0.0052 M$ abhängt, und $c_p = 1.01 \text{ kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ die spez. Wärme der Luft.

Der Fluß latenter Wärme aus der Atmung E_{res} hängt von der Differenz der Mischungsverhältnisse von Aus- und Einatem-

luft, der Ventilationsrate V und der Verdampfungswärme von Wasser λ ab:

$$E_{res} = V \cdot \lambda \cdot (MH_{ex} - MH_a), \quad (18)$$

woraus mit $MH = 0.622 \frac{e}{p-e} \cong 0.622 \frac{e}{p}$ und $p = 1000$ mbar folgt (E_{ex} : Sättigungsdampfdruck in mbar bei t_{ex}):

$$E_{res} = 0.0018 M (E_{ex} - e) \quad [W] \quad (19)$$

Die respiratorischen Wärmeverluste sind relativ klein. Bei einer Lufttemperatur von $t_a = 0^\circ C$ und einem Stoffumsatz von $M = 210$ W ($\frac{M}{A_D} = 116$ W/m² für $A_D = 1.8$ m²) errechnet sich $C_{res} = 7.35$ W, also nur 3.5% der Wärmeproduktion. Die insensible Wärmeabgabe beträgt bei $t_a = 0^\circ C$ im Nebel ($e = 6,11$ mbar) $E_{res} = 0.0018 \cdot 210 \cdot (31.7 - 6,11) = 9.67$ W. Mit zunehmender Außentemperatur nimmt der fühlbare Wärmeverlust ab und wird in dem Modell bei $t_a = 38.5^\circ C$ Null. Bei dieser Temperatur beträgt $E_{ex} = 68.1$ mbar und für z. B. einen aktuellen Dampfdruck $e = 18.1$ mbar (RH = 26%) folgt für $E_{res} = 18.9$ W; dieser Betrag macht aber noch keine 10% der Wärmebildung aus.

3.6 Physiologische Parameter in der Energiebilanz

Der Ausgleich von Wärmeproduktion und Wärmedissipation ist grundsätzlich bei jeder Körpertemperatur erreichbar. Ein Energiebilanzmodell des Menschen muß jedoch berücksichtigen, daß der Mensch als homoiothermes Lebewesen durch Einsatz seines Thermoregulationssystems die Kerntemperatur näherungsweise bei $t_c = 37^\circ C$ konstant zu halten sucht, auch wenn unter instationären Bedingungen eine Schwankungsbreite von 35 bis 41 $^\circ C$ beobachtet werden kann.

Bei vorgegebenem Stoffumsatz sind mittlere Hauttemperatur t_s und Wärmeverlust durch Verdunstung von Schweiß E_{rs} die einzigen physiologischen Variablen, die den Wärmehaushalt beeinflussen, und sie werden entsprechend den thermischen Umgebungsbedingungen so eingestellt, daß die Wärmebilanzgleichung befriedigt wird. Dabei bewirkt die Thermoregulation im kalten Bereich, daß die Hauttemperatur t_s eng den Umgebungsbedingungen nachgeführt wird, während unter warmen Bedingungen Sekretion von Schweiß veranlaßt wird, um die Abgabe latenter Wärme E_{rs} zu erhöhen.

FANGER (1972) fand, daß t_s und E_{rs} im Behaglichkeitsbereich eine lineare Funktion des Energiestoffwechsels darstellen. Damit können diese beiden Größen in der Wärmebilanzgleichung eliminiert werden und es treten nur noch die Variablen innere Wärmeproduktion H (Tab. 1), Wärmeisolation der Bekleidung I_{cl} (Tab. 2) und die meteorologischen Parameter t_a , e , v , t_{mrt} auf. Da die Behaglichkeit stationäre Verhältnisse voraussetzt, verschwindet in Gleichung (1) der Speicherterm S . Damit ist zwar die unbedingte Erfüllung der Bilanzgleichung für beliebige Kombinationen der oben angeführten Variablen nicht mehr gegeben, aber der Grad der Nichterfüllung kann als Maß für die Anforderung an das Thermoregulationssystem aufgefaßt werden, die in Abschnitt 2 beschriebenen Regulationsmechanismen über deren minimale Aktivität bei Behaglichkeit hinaus wirksam werden zu lassen. FANGER konnte zwischen dieser „Belastung“ und dem mittleren subjektiven thermischen Empfinden eines größeren Kollektivs von Personen auf einer psycho-physikalischen Skala eine Beziehung herstellen (PMV = Predicted Mean Vote, siehe auch

Abschn. 4); sein Modell bildet eine Grundlage für das „Klima-Michel-Modell“, welches von JENDRITZKY et al. (1979) für Analysen des thermischen Milieus bei Freilandbedingungen entwickelt wurde.

Die Anwendbarkeit des Fanger-Modells ist durch den empirischen Ansatz für t_s und E_{rs} auf nicht zu große Abweichungen von den Behaglichkeitsbedingungen beschränkt. Für die Betrachtung extremerer Verhältnisse muß die Energiebilanz des Menschen jedoch die Physiologie der aktiven Thermoregulation berücksichtigen. GAGGE et al. (1970) haben dazu ein einfaches 2-Komponentenmodell mit Kern und Schale entwickelt, in dem die gesamte anfallende Wärme incl. derjenigen aufgrund von Thermoregulation $M(1-\eta) + M_{shiv}$ im Körperkern gebildet wird. Die Bilanzierung erfolgt über den Wärmeverlust durch Atmung Q_{res} , Wärmeleitung in Gewebe und Transport mit dem Blutfluß V_b zur Schale und schließlich Wärmespeicherung im Kern:

$$M(1-\eta) + M_{shiv} = Q_{res} + A_D(k + V_b c_b)(T_c - T_s) + m_c c_c \frac{dT_c}{dt} \quad (20)$$

Die in die Schale transportierte Wärme wird z. T. über Strahlung R , Konvektion C und Verdunstung E_{sw} an die Atmosphäre abgegeben, z. T. in der Schale gespeichert. Dadurch steigt die Temperatur der Schale an; die relative Größe der Schale nimmt ab:

$$A_D(k + V_b c_b)(T_c - T_s) = A_D(C + R + E_{sw}) + m_s c_s \frac{dT_s}{dt} \quad (21)$$

mit: T_c Kerntemperatur in K

T_s Hauttemperatur in K

k Wärmeleitfähigkeit des Gewebes [W m⁻¹K⁻¹]

c_b Wärmeleitfähigkeit des Blutes

c_c spez. Wärmen für Kern [kJ kg⁻¹K⁻¹]

c_s spez. Wärmen für Schale

V_b Blutfluß von Kern zur Schale [l h⁻¹ m⁻²]

$V_b = Fkt(T_c, T_s)$

m_s Anteil der Schale an der Gesamtmasse m_{ges} in kg,

$m_s = \alpha m_{ges}$ mit $\alpha = Fkt(V_b)$ entsprechend Abb. 1.

Eine Umordnung der Gleichungen (20) und (21) nach $\frac{dT_c}{dt}$ bzw. $\frac{dT_s}{dt}$ und Integration liefert T_c und T_s . Das Modell erlaubt ferner den Nässegrad der Haut w und den Verlust von latenter Wärme E_{rs} von der Hautoberfläche in Abhängigkeit von α , T_c und T_s zu bestimmen.

Die Auswirkungen der Thermoregulation des Menschen mit ihren zahlreichen Rückkoppelungen auf die einzelnen Terme der Wärmebilanz werden durch kompliziertere Vielkomponentenmodelle noch angepaßter simuliert. Solche Modelle können z. B. berücksichtigen, daß bei Arbeit die Wärmebildung nicht im Kern, sondern in der Muskulatur anfällt mit einer Temperatursteigerung bis über 40 $^\circ C$, so daß sich kein einfaches Temperaturgefälle Kern-Schale im Sinne des Zwei-Komponentenmodells einstellen kann. Auch asymmetrische Bedingungen der Wärmeabgabe z. B. durch Einwirkung direkter Sonnenstrahlung und andere lokale Effekte wie örtliches Schwitzen oder Zugluft bei z. B. unterschiedlicher Bekleidungsisolation bedingen, daß die Annahme einer repräsentativen mittleren Hauttemperatur t_s , die sich durch Mittelbildung aus einer Folge von Messungen an unterschiedlich zu wichten-

den Meßpunkten ergibt, unhaltbar wird. Entsprechendes gilt auch für die mittleren Wärmeübergangszahlen h_c und h_e .

4 Subjektives Empfinden und thermische Belastung

Untersuchungen über die subjektive Einschätzung des thermischen Milieus werden anhand von psycho-physikalischen Skalen durchgeführt, bei denen z. B. die Zahlenfolge von -3 bis $+3$ den Aussagen kalt, kühl, leicht kühl, neutral, leicht warm, warm, heiß zugeordnet werden. Analog dazu läßt sich auch mit Behaglichkeit als Nullpunkt der Grad des Kalt- bzw. Warmdiskomforts skalieren. Der Kurvenverlauf in Abbildung 6 macht aber deutlich, daß Empfindensaussagen durch eine ausgeprägte interindividuelle Varianz charakterisiert sind, wie sie auch für physiologische Parameter bekannt ist (Problem der Normalwerte in der Medizin). Das subjektive Empfinden der thermischen Umgebungsbedingungen korreliert i. a. solange recht gut mit dem physiologischen Befinden, d. h. dem Status des Thermoregulationssystems mit seinen Auswirkungen auf das Herz-Kreislaufsystem und den Stoffwechsel, wie nicht stärkere Reize z. B. durch instationäre oder asymmetrische Bedingungen, lokale Einflüsse oder starke Aktivität auftreten.

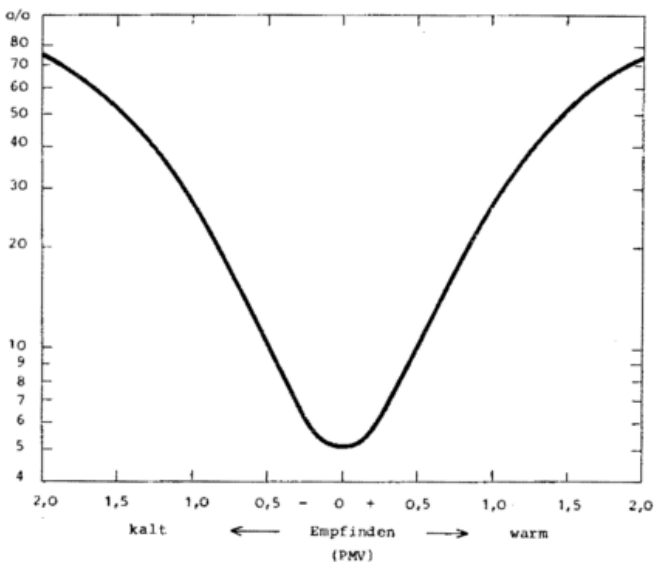


Abb. 6: Prozentsatz von Personen im Diskomfort als Funktion des errechneten Empfindens (PMV = Predicted Mean Vote) auf einer psycho-physikalischen Skala (aus FANGER, 1972).

Bei thermischer Behaglichkeit tritt in Körperruhe weder eine Stoffwechselsteigerung als Zeichen der chemischen Wärmeregulation gegen Abkühlung, noch eine Schweißproduktion als Zeichen der physikalischen Wärmeregulation gegen Erwärmung des Körpers auf (HENSEL, 1973 (a)); die Feineinstellung erfolgt vasomotorisch. Damit sind Hauttemperaturen zwischen 32 und 34°C verbunden. Die thermische Behaglichkeit ist eng mit dem integrativen Gesamtzustand des Thermoregulationssystems verknüpft (Abb. 2), während dazu im Gegensatz die Temperaturempfindung von der Hauttemperatur bestimmt wird (HENSEL, 1973 (b)). Wegen der beiden unterschiedlichen Empfindensqualitäten und der nicht jederzeit gegebenen direkten Beziehung zu einer objektiven physiologi-

schen Belastung kritisiert AULICIEMS (1981) deshalb die synonyme Verwendung von Begriffen wie „neutral“, „optimal“, „komfortabel“, „bevorzugt“ zur Beschreibung der thermischen Umgebungsbedingungen.

In Kälte kann die Unbehaglichkeitsempfindung zwar auch vom Frösteln durch Kältezittern besonders an Rumpf und proximalen Extremitäten ausgelöst werden, aber eine Reaktion auf erniedrigte Hauttemperaturen an den entfernten (distalen) Extremitäten und besonders im Gesicht („Wind- und Wetterreflex“) erfolgt viel schneller. Die Temperatur der Zehen und Finger stellt also einen guten Indikator für den totalen Kaltdiskomfort dar. Deshalb bevorzugen ältere Personen höhere Komforttemperaturen zum Ausgleich ihrer kälteren Extremitäten. Als ein objektives Maß für die thermoregulatorische Belastung des Organismus bei geringer Kälte wäre eine Größe geeignet, die Information über die Verminderung des Wärmefflusses durch den Blutkreislauf V_b bei Vasokonstriktion enthält (BERGLUND, 1978), während bei stärkerer Kälte die Steigerung der Wärmeproduktion die entscheidende Größe darstellt.

Die Unterschiede in den Empfindungsqualitäten fallen bei Behinderung der Wärmeabgabe besonders auf. Bei Abweichungen von thermisch neutralen Bedingungen nimmt nämlich das Gefühl der Unbehaglichkeit langsamer zu, als das subjektive thermische (Temperatur-)Empfinden; etwa als leicht zu warm bezeichnete Bedingungen werden noch als angenehm empfunden. Der Bruchteil w der durch Schweiß nassen Haut stellt jedoch ein objektives Maß für die Belastung der Thermoregulation wie für das subjektive Empfinden dar. Weniger als 20% Nässegrad werden i. a. noch als behaglich empfunden; darüber nimmt der Warmdiskomfort zu, und wenn etwa die Hälfte der Haut mit Schweiß bedeckt ist, wird auch die physiologische Belastung deutlicher. Bei $w = 1.0$ ist keine Regulation der Wärmeabgabe durch Steigerung der Schweißsekretion mehr möglich und die Überwärmung des Körpers bis zur kritischen Schwelle des Hitzschlages hängt nur noch von der Expositionsdauer ab. Bei vollständig feuchter Oberfläche — und nur dann — ist die Temperatur des Feuchtthermometers — und damit auch die Äquivalenttemperatur — ein geeigneter Index in humanphysiologischen Studien, der jedoch bei einer Hauttemperatur unter der Grenze des starken Schwitzens schnell unbrauchbar wird (MONTEITH, 1978).

Die thermophysiologische Bedeutung des Begriffes „Schwüle“ — obwohl aus dem täglichen Sprachgebrauch — ist noch weitgehend ungeklärt. Sicher hängt dieses subjektive Empfinden auch mit der Benetzung der Hautoberfläche zusammen, aber das unangenehme Gefühl einer schmierigen Haut und einer feucht-klebrigen Kleidung dürfte zumindest im Klima Mitteleuropas eine ebensolche Rolle spielen, wie die objektive Belastung. Dies weist auf Einflüsse im psychischen Bereich der Wahrnehmung hin, die durch sozio-kulturelle und klimatische Erfahrungen (Habitation) und Erwartungen bedingt sind; der thermische Status des Menschen hängt also nicht allein von physiologischen Parametern ab (AULICIEMS, 1981), wobei insgesamt noch ein Defizit bei den Kenntnissen über die Beziehungen von Physis und Psyche festgestellt werden muß.

Das Interesse der Physik der Atmosphäre an Modellen der Wärmebilanz des Menschen resultiert nun aus der Möglichkeit, mit diesen Modellen physiologisch relevante Analysen

der meteorologischen Wärmeabgabe durchführen zu können. Solche Analysen bilden die Grundlage für eine objektive Bewertung der Klimateignung im Rahmen einer klimagerechten Vorsorgeplanung im Humanbereich, die in Verbindung etwa mit Dauerwohnsitz, Gesundheitswesen (therapeutische Nutzung und Dosierung), Freizeitaktivitäten, Wochenenderholung und Tourismus steht (SCHIRMER, 1980). In der Stadtklimatologie liefern Simulationsrechnungen über die Beziehungen der Wärmebilanz des Menschen zu den atmosphärischen Bedingungen der Wärmeabgabe bei unterschiedlichen Siedlungsstrukturen dem Planer wertvolle Hinweise und Entscheidungshilfen (JENDRITZKY, 1981).

Literatur

- ASCHOFF, J.: Temperaturregulation. In: GAUER, KRAMER, JUNG (Hrsg.): Physiologie des Menschen. Bd. 2. München: Urban & Schwarzenberg 1971, S. 43—222.
- ASCHOFF, J.; WEVER, R.: Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen. *Naturwissenschaften* 45 (1958) S. 477—485.
- AULICIEMS, A.: Towards a psycho-physiological mode of thermal perception. *Int. J. Biometeorol.* 25 (1981) Nr. 2, S. 109—122.
- BERGLUND, L. G.: The use of simulation models of human thermoregulation in assessing acceptability of complex dynamic thermal environments in energy conservation strategies in buildings. In: J. A. J. STOLWIJK (Ed.): *Energy Conservation Strategies in Buildings*. New Haven: J. B. Pierce Foundation (1978) S. 157—191.
- CAMPBELL, G. S.: *An introduction to environmental biophysics*. New York: Springer 1977.
- FANGER, P. O.: *Thermal comfort*. New York: McGraw-Hill 1972.
- GAGGE, A. P.; STOLWIJK, J. A. J.; NISHI, Y.: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulator response. *ASHRAE Trans.* 70 (I) (1970).
- HARDY, J. D.: Regulation of body temperature in man-an overview. In: J. A. J. STOLWIJK (Ed.): *Energy Conservation Strategies in Buildings*. New Haven: J. B. Pierce Foundation (1978) S. 14—37.
- HENSEL, H.: Temperaturregulation. In: W. D. Keidel (Hrsg.): *Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie*. Stuttgart: Thieme 1973, S. 224—235 (a).
- HENSEL, H.: Temperature reception and thermal comfort. *Arch. Sci. Physiol.* 27 (1973) S. 359—370 (b).
- HÖPPE, P.: Temperatures of expired air under varying climatic conditions. *Int. J. Biometeorol.* 25 (1981) Nr. 2, S. 127—132.
- HÖSCHELE, K.: Ein Modell zur Bestimmung des Einflusses der klimatischen Bedingungen auf den Wärmehaushalt und das thermische Befinden des Menschen. *Arch. Meteorol. Geoph. Biokl. Ser. B* 18 (1970) S. 83—99.
- JENDRITZKY, G.; SÖNNING, W.; SWANTES H.-J.: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung („Klima-Michel-Modell“). *Beitr. Akad. Raumforsch. u. Landespl.* 28 (1979).
- JENDRITZKY, G.; SÖNNING, W.: Der Einfluß der Strahlung auf die thermischen Bedingungen in der Klimatherapie. *Z. Phys. Med.* 6 (1979) S. 283—291.
- JENDRITZKY, G.; NÜBLER, W.: A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Arch. Meteorol. Geoph. Biokl., Ser. B* 29 (1981) S. 313—326.
- MONTEITH, J. L.: *Grundzüge der Umweltphysik*. Darmstadt: Steinkopff 1978.
- MOUNT, L. E.: The Concept of thermal neutrality. In: MONTEITH and MOUNT (Hrsg.): *Heat Loss from Animals and Man*. London: Butterworth (1974) S. 425—439.
- NISHI, Y.: The role of air velocity in promoting comfort and acceptability of thermal environments of 65—85°F (18 to 30°C). In: J. A. J. STOLWIJK (Ed.): *Energy Conservation Strategies in Buildings*. New Haven: J. B. Pierce Foundation (1978) S. 71—94.
- NISHI, Y.; GAGGE, A. P.: Moisture permeation of clothing. A factor governing thermal equilibrium and comfort. *ASHRAE Trans.* 76 (I). (1970).
- SCHIRMER, H.: Raumplanung und Klima. In: *Klima und Planung* 79. Tg. Ber. Geogr. Inst. Univ. Bern (1980) S. 11—20.
- SPITZER, H.; HETTINGER, Th.; KAMINSKY, G.: *Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit*. Berlin: Beuth Verlag 1982.
- WENZEL, H. G.; PIEKARSKI, C.: *Klima und Arbeit*. Hrsg.: Bay. Staatsmin. f. Arbeit u. Sozialordnung. München 1982.

8

Zur Möglichkeit biologischer Wirkungen elektrischer und elektromagnetischer Felder, Ionen und Aerosolen

Im Hinblick auf den beschränkten Raum kann die sehr umfassende Thematik hier nur bruchstückhaft angerissen werden, wobei die Hinweise auf inhaltsreiche Literaturstellen oder Buchveröffentlichungen dem interessierten Leser weiterhelfen können. Wir werden uns hier im wesentlichen auf die in der Natur vorkommenden Erscheinungen der zu diskutierenden Größen beschränken, wenige Anmerkungen zu künstlichen Quellen sind aber notwendig. Ferner werden wir uns nur mit der Frage der möglichen Wirkungen (und Korrelationen) befassen, aber nicht mit der Anwendung künstlich erzeugter elektrischer Parameter an biologischen Systemen. Auf Laborversuche, welche uns Antworten auf die mögliche Wirksamkeit natürlicher Parameter geben können, muß allerdings an einigen Stellen hingewiesen werden.

1 Elektrische und elektromagnetische Felder

1.1 Welche Arten von Feldern sind in Betracht zu ziehen?

Wir müssen unterscheiden:

- Ia) Zeitlich weitgehend konstante — statische — elektrische Felder;
- b) Sprunghafte, aber zeitlich irregulär auftretende Veränderungen des statischen elektrischen Feldes;
- II) Langsame, annähernd sinusförmige Variationen (Schwingungen) des elektrischen Feldes und damit auch des gekoppelten magnetischen Vektors
= ELF, Schumann-Resonanzen mit maximalen Amplituden bei 8, 14, 20 Hz und auch höheren Frequenzen. Feldstärke in der Größenordnung von mV/m (s. z. B. (1), (2), (3)).
- III) Elektromagnetische *Wellen* vom Charakter stark gedämpfter Schwingungen oder Impulsfolgen, die zeitlich irregulär auftreten und von Blitzentladungen ausgestrahlt werden, wobei — je nach Frequenz und Ausbreitungsbedingungen — sehr große Entfernungen entlang der Erdoberfläche überbrückt werden können. Man bezeichnet sie deshalb als „atmospherics“ oder „spherics“. Der wichtigste Frequenzbereich umfaßt, ausgehend von einigen kHz (Feldstärken bis zu 1 V/m) bis etwa 100 MHz (Feldstärken um 50 μ V/m (1) (2) (3)). Das Frequenzspektrum der Impulse ist meist recht komplex. Auch ist die mittlere Impuls-Folge-Frequenz zu bedenken, mit der die Impulsgruppen oder Wellenzüge nacheinander eintreffen (in der Hauptsache abhängig von der Blitzfrequenz).

Das im Freien weit abseits von leitenden Gegenständen (hierzu gehören auch Bäume, Holz-, Stein- oder Eisenkonstruktionen, alle Arten von Gebäuden, elektrische Freileitungen usw.) über einer Ebene feststellbare „natürliche“ elektrische Feld besitzt eine mittlere Stärke von ungefähr 150 V/m, vorausgesetzt, daß es sich um ausgesprochenes Schönwetter handelt. Dieses Feld wird (es gibt bis heute keine bessere Theorie) durch die Summe aller Gewitter auf der Erde aufrechterhalten

(Theorie nach WILSON, s. auch (3)), welche fortgesetzt positive Ladung zu den untersten Schichten der gut leitenden Ionosphäre abgeben, wodurch sich auf der Erdoberfläche eine negative Gegenladung ausbildet. Die Spannung zwischen unterster Ionosphäre und Erdoberfläche beträgt etwa 300 kV/m. Der atmosphärische Ausgleichsstrom infolge Transport der Kleinionen in der Luft zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre, ausgelöst durch das beschriebene globale elektrische Feld, würde in mehreren Minuten zum Abbau desselben führen, weshalb fortwährend Generatoren in Form der weltweit verstreuten Gewitter (mit hoher Häufigkeit im Tropengürtel) notwendig sind.

Unabhängig von diesem globalen Feld existieren überall dort zusätzliche, mehr oder weniger lokal begrenzte elektrische Felder oft hoher Stärke, wo Ladungen innerhalb von Wolken durch verschiedenste Prozesse voneinander getrennt werden. Eine solche Ladungstrennung ist erfolgt in erster Linie im Bereich des Niederschlages in oder aus Wolken und auch schon kurz vor und während der Niederschlagsbildung (3) (5). Die unter solchen Bedingungen innerhalb der Wolken (x) und darunter (+) auftretenden Feldstärken können bis zur Durchbruchfeldstärke von 10 (x) bis 30 (+) kV/m anwachsen und somit elektrische Entladungen innerhalb oder von der Wolke zum Boden auslösen.

Dies können sowohl Glimmentladungen an spitzen Gegenständen (Baumgipfel!) als auch direkte Blitzentladungen sein, wie sie für das Gewitter charakteristisch sind (3) (4). Das Erscheinungsbild solcher Feldstärken und insbesondere ihre Abhängigkeit von meteorologischen Vorgängen ist außerordentlich komplex, man findet hierüber umfassende Angaben in (3) (4), vor allem (5).

Zurückkommend auf unsere oben gegebene Einleitung ist zusammenfassend zur Klärung festzuhalten:

- Ia) ist die Folge der globalen Gewittertätigkeit und elektrischen Aufladung des kugelkondensator-ähnlichen Systems: Untere Ionosphäre-Erdoberfläche. Variationen treten als Tagesschwankung weltzeitgebunden auf, örtlich durch Inhomogenitäten des Feldes in der näheren und weiteren Umgebung von elektrischen Leitern.
- Ib) findet man in der näheren und weiteren Umgebung von blitzförmigen Entladungen, sind also an meteorologische „Störprozesse“ gebunden.
- II) ist die Folge der Grund- und Oberschwingungen des oben erwähnten Kugelkondensator-Systems mit einer Eigenschwingung in der Größenordnung um 10 Hz. Angestoßen wird diese Schwingung durch Blitzentladungen (s. (2) (3)).
- III) ist die Folge einer elektromagnetischen Abstrahlung vom Dipol elektrischer Entladungen (Blitze), welche sich je nach Frequenz weltweit ausbreiten und auch zur Anpeilung von Gewittern über sehr große Distanzen geeignet sind (2) (3).

1.2 Abschirmung bzw. Eindringfähigkeit in Materialien

Bevor wir uns mit der Frage nach der Möglichkeit biologischer Wirkungen der in 1.1 definierten elektrischen Felder und elektromagnetischen Wellen befassen können, ist klarzustellen, auf welche Weise diese abgeschirmt werden, bzw. unter welchen Voraussetzungen sie in die Materie eindringen können.

Zunächst steht fest, daß das statische, also zeitlich praktisch unveränderte elektrische Feld, wie es zwischen elektrischen Ladungen aufgebaut wird, durch jeden Körper vollständig abgeschirmt wird, dessen Leitfähigkeit um mindestens zwei Zehnerpotenzen größer ist als die der Luft (etwa $10^{-14} \text{ Ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}$). Folglich ist die im freien Feld feststellbare Feldstärke bereits nahe und unter einem Baum praktisch Null, erst recht im geschlossenen Wald und ebenso in unmittelbarer Nähe von einem Gebäude und im Gebäude ganz unabhängig von seiner Bauweise (Stein oder auch Holz, ja sogar selbst Glas oder Papier wirkt total abschirmend). Natürlich können innerhalb eines geschlossenen Raumes, der frei ist vom atmosphärischen elektrischen Feld, künstlich elektrische Felder durch Ladungen an Gegenständen auftreten, worüber später zu sprechen ist.

Macht das statische elektrische Feld eine sprunghafte Änderung, so wirkt sich dieser Vorgang auch im Inneren eines Körpers aus mäßig leitendem Material (und in einem Raum, dessen Wände aus Holz, trockenen Ziegeln usw. besteht) ebenso auch im Wald, durch eine impulsförmige Feldstärkenspitze aus, die etwa der zeitlichen Ableitung der Feldstärkeänderung entspricht.

Damit können wir die Frage, ob statische elektrische Felder in ein biologisches System (Mensch oder Tier) eindringen und wirken können verneinen. Dies gilt aber schon nicht mehr sicher für rasche zeitliche Feldsprünge.

Fragen wir jetzt nach der Eindringfähigkeit elektromagnetischer Schwingungen in Materialien unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit, so gibt Abbildung 1 Auskunft: Die Ordinate gibt die Eindringtiefe in Metern an, wobei wir darunter verstehen wollen, daß die primär gegebene Amplitude der Schwingung nach der angegebenen Eindringtiefe in Metern auf den e^{-1} -ten Wert abgesunken ist. Wir sehen deutlich, daß die Eindringtiefe einerseits mit der Frequenz ansteigt, andererseits mit zunehmender Leitfähigkeit abnimmt. In Seewasser (damit in biologische Objekte) dringen elektromagnetische Wellen erst dann nennenswert ein, wenn die Frequenz größer als einige 1000 Hz ist. Für trockenen Sand finden wir eine Eindringtiefe von etwas weniger als 1 m bei 50 Hz. Höhere Frequenzen dringen noch tiefer in mäßig leitendes Material ein. Das bedeutet, daß „atmosphärisch“, also elektromagnetische gedämpfte Wellen, die von Blitzen weithin ausgestrahlt werden, in normale geschlossene Gebäude eindringen, dasselbe gilt auch für den Körper von Mensch und Tier.

Die geschilderten Fakten liefern auch die Voraussetzungen für die Abschätzung, unter welchen Bedingungen überhaupt biologische Wirkungen zu erwarten sind: Nämlich nur dann, wenn die betreffende elektrische Größe in der Lage ist in den Körper nennenswert einzudringen, so daß mindestens Teile des nervösen Systems erreicht werden. In einem vollständigen Faraday-Käfig ist natürlich die elektrische Komponente elektromagnetischer Schwingungen, ebenso alle statischen elektri-

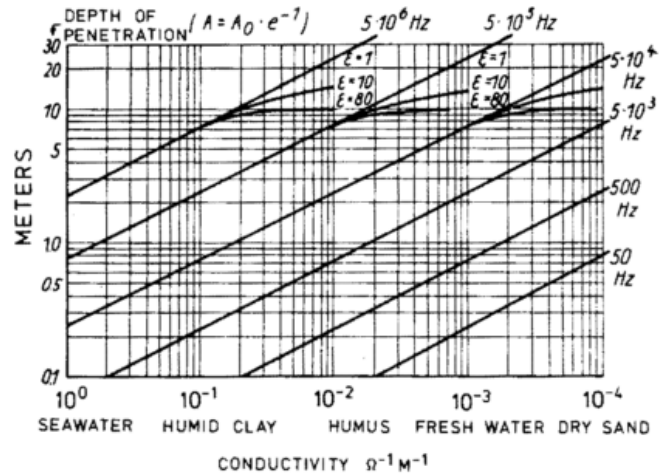


Abb. 1: Abhängigkeit der Eindringtiefe (angegeben in Metern) in Abhängigkeit von der Frequenz der elektromagnetischen Wellen und von der elektrischen Leitfähigkeit des zu durchdringenden Materials. Bei hohen Frequenzen geht noch die Dielektrizitätskonstante ϵ ein.

schen Felder gleich Null. Jedoch sind Gebäudewände nur gegenüber mittelfrequenten bis hochfrequenten Schwingungen durchdringbar, aber nicht für statische Felder.

1.3 Grundfehler bei der Durchführung biologischer Versuche mit elektrischen Feldern oder elektromagnetischen Wellen

Bevor wir uns im nächsten Abschnitt einigen Befunden zur möglichen Wirksamkeit elektrischer Felder oder elektromagnetischer Wellen (bzw. sferics) zuwenden, ist es notwendig, auf einige Grundfehler hinzuweisen, die oft bei der Durchführung biologischer Experimente gemacht werden. Eine Antwort auf die im Thema des Artikels gestellte Frage können wir nämlich nur indirekt aus experimentellen Untersuchungen ableiten, die in Laboratorien bei Verwendung künstlicher Felder bzw. elektromagnetischer Wellen durchgeführt worden sind.

Oft sind die in der Literatur zu findenden Angaben über die angewandten Feldstärken bei Käfigversuchen äußerst zweifelhaft. Normalerweise berechnet man im Falle eines homogenen Feldes mit unendlich ausgedehnten Elektrodenflächen die Feldstärke aus dem Quotienten der Spannungsdifferenz zwischen den beiden Elektroden und der Distanz dazwischen. Unter den üblichen Laboratoriumsbedingungen mit endlichen Ausdehnungen und mehr oder weniger kompliziert geformten Elektroden ist eine solche vereinfachte Berechnung der Feldstärken nicht möglich.

Noch unübersichtlicher werden die Verhältnisse, wenn Tiere in Behältern gehalten werden, die zwar im üblichen Sinne Nichtleiter sind (z. B. Glaswannen). Das Feld wird außerordentlich verzerrt, da selbst Glas nicht als idealer Isolator zu betrachten ist, zumal seine Oberfläche in der Regel durch Kondensate, Verschmutzung usw. halbleitend ist.

Hält man Versuchstiere in solchen Käfigen, so bewegen sich diese Tiere im elektrischen Feld und erzeugen auf diese Weise selbst ein äußerst unübersichtliches „Wechselfeld“ durch ihre

Körperbewegungen, so daß dann Feldstärkeangaben sinnlos werden. Leider wurde bis heute unsere Grundforderung kaum erfüllt, nämlich am biologischen Versuchsobjekt direkt die applizierte elektrische Stärke des Feldes oder auch der elektromagnetischen Schwingungen zu messen.

Bei Untersuchungen an Versuchspersonen wird selten beachtet, daß sich die Kleider der Versuchspersonen bei allen ihren Bewegungen mehr oder weniger stark auf- bzw. wieder entladen und so starke Schwankungen künstlicher Feldstärken um die Person aufbauen, die oft um Größenordnungen die applizierten Versuchsfelder an Stärke übertreffen.

Abbildung 2 zeigt bei a den Verlauf der elektrischen Feldstärke an unserer Station Zugspitze bei einem einige km entfernten Gewitter und bei einem Schauer. Registrierung b zeigt die elektrische Feldstärke für den Fall, daß um die Station herum starkes Schneetreiben stattfindet. Man enthalt auf diese Weise bei b rasch aufeinanderfolgende Feldspitzen mit 5 kV/m und

mehr (meist positiv). Registrierung c zeigt an einem Schönwettertag die positiven Feldstärkespitzen, welche allein durch Personen ausgelöst sind, die in der Nähe unseres Meßgerätes vorbeigehen und in der Regel synthetische Textilien tragen. Im Vergleich zu Fall b können wir kaum einen Unterschied feststellen. Dies bedeutet, daß der bekleidete Mensch sowieso fortwährend elektrischen Feldstärkeschwankungen ausgesetzt ist, wie sie in der Natur nur unter Schlechtwetterbedingungen auftreten können. Versuchspersonen sind also entsprechend zu bekleiden und es muß die elektrische Feldstärke unmittelbar in Körperrnähe fortwährend überwacht werden.

Auf einen weiteren Umstand müssen wir hinweisen: Allein durch die Elektroinstallation in den heute üblichen Bauwerken werden elektrische Wechselfelder aufgebaut. Dies betrifft nicht allein die allgemein übliche Netzfrequenz von 50 Hz. Besonders auffallend sind z.B. die Oberwellen der Grundschwingung von 50 Hz im Falle der Verwendung von Leucht-

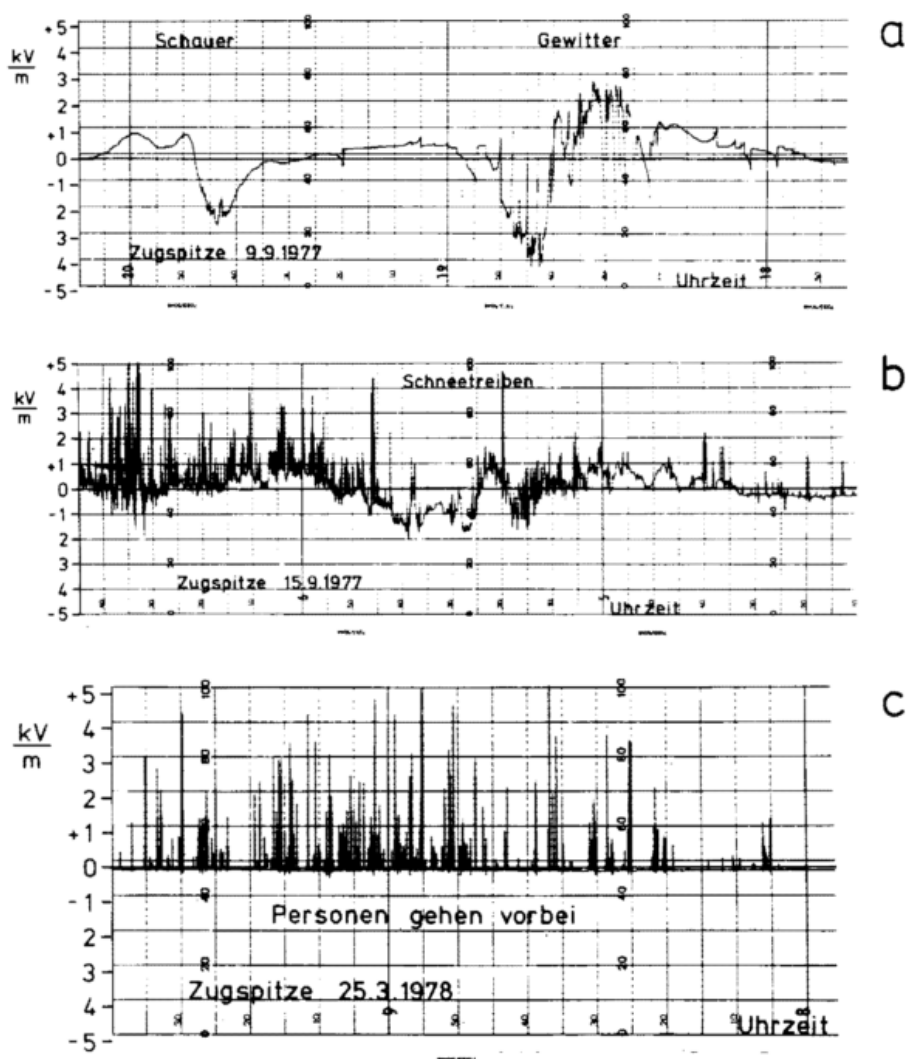


Abb. 2: Verhalten des elektrischen Feldes, registriert an der Zugspitze während eines Schauers und während eines Gewitters, welches sich in einigen Kilometern Distanz befand (Zeile a).

Rasche, spitzenähnliche Veränderungen des elektrischen Feldes während Schneetreiben in unmittelbarer Nähe der Meß-Station (Zeile b).

Positive Feldstärke-Spitzen nach Eintreffen der ersten Gondel der Zugspitzbahn am Gipfel durch vorbeigehende Touristen in Synthetic-Kleidung. Die Personen passierten den Meßfühler in etwa ein bis zwei Meter Distanz (Zeile c).

stoffröhren. Abbildung 3 zeigt dies in einem beliebig herausgegriffenen Schulraum eines Gymnasiums: Die Feldstärke­spitzen reichen bis über 1 kHz hinaus und man findet selbst bis 10 kHz noch meßbare Werte. Dies bedeutet weiterhin, daß Versuchsräume mit größter Sorgfalt nicht nur elektrostatisch abgeschirmt sein müssen, sondern daß auch alle technisch be­dingten Felder ausgeschlossen sein müssen.

Übrigens findet man erhebliche Wechselfeldstärken in der Nähe von Fernsehgeräten, Computer-Terminals und anderen Geräten unserer technischen Umwelt. Teppiche, Möbelober­flächen, Büromaterialien können sich statisch beträchtlich aufladen und auch ihre Ladung sehr lange erhalten und da­durch Feldstärken erzeugen.

1.4.2 Niederfrequente elektrische und magnetische Felder

Da elektrische Feldstärke-Änderungen immer mit magneti­schen Feldänderungen verknüpft sind, sollen hier der Reihe nach beide Einflußgrößen im Lichte des Themas besprochen werden.

FRIEDMANN (8) konnte keinerlei Wirkungen an Versuchs­personen in Feldern mit elektrischen Rechteckimpulsen zwi­schen 1–15 kV/m und 10 Hz erzielen. Auch an Mikroorga­nismen und Pilzen verliefen alle Versuche negativ.

Besondere Beachtung verdienen aber die äußerst sorgfältig ausgeführten Versuche an Einzelpersonen von WEVER (9). Die Personen befanden sich wochenlang in einer bequem ein-

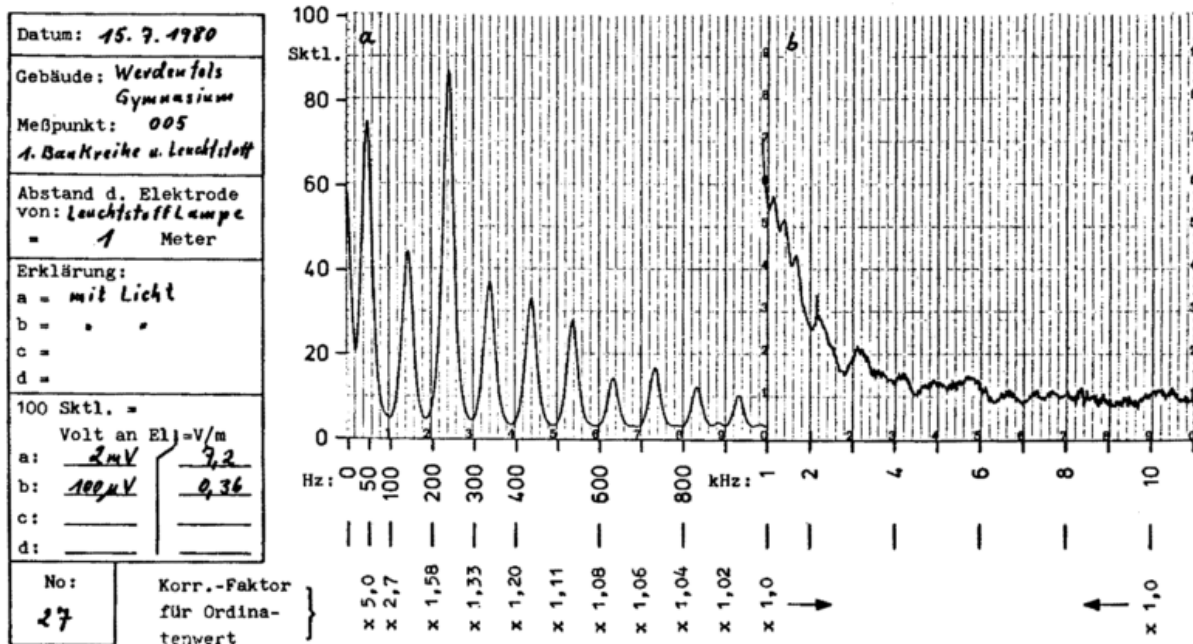


Abb. 3: Elektrisches Wechselfeld in 1 Meter Distanz von einer Leuchtstoffröhre;

- a) Zwischen 50 (Grundfrequenz) und 1 kHz, sowie
- b) zwischen 1 und 10 kHz. Im Frequenzbereich bis 1 kHz sind die Oberschwingungen der Grundfrequenz des Netzes deutlich abgebildet. Aber auch noch höhere Frequenzanteile kommen vor. Im Frequenzbereich a betragen 100 Skalenteile etwa 7 V/m.

1.4 Was ist heute sicheres über biologische Wirkungen von elektrischen Feldern oder elektromagnetischen Wellen bekannt?

1.4.1 Statisches, elektrisches (und magnetisches) Feld

Mit Rücksicht auf die Tatsache, daß das statische, zeitlich unveränderliche elektrische Feld nicht in den Körper eindringen kann und unter normalen Voraussetzungen auch keine Ströme im Körper auslöst, die auch nur annähernd an die körpereigenen Stromstärken heranreichen, ist schon von vornherein nicht mit Wirkungen zu rechnen. Kritisch durchgeführte Untersuchungen haben dies schließlich auch eindeutig erwiesen. Alle Spekulationen, die oft in gewisser Literatur zu finden sind: Das statische elektrische Feld der „Natur“ sei von Bedeutung für die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen, beruhen auf Irrtum oder Spekulation. Veröffentlichte Ergebnisse mit positivem Erfolg haben sich später als Meßfehler herausgestellt. Ausführliche Darstellungen hierzu finden sich (6) (7). Analoges gilt für konstante Magnetfelder.

gerichteten unterirdischen Wohnung, die vollkommen von der Außenwelt getrennt und künstlich konstant klimatisiert war. Sie war von allen Signalen der Außenwelt isoliert. Die Personen blieben auf sich allein gestellt, konnten sich geistig beschäftigen oder auch erholen, kochen und schlafen. Schlaf und Aktivität wurden automatisch registriert, ebenso zahlreiche physiologische Körperfunktionen. Es zeigte sich, daß die Personen in der Regel vom 24stündigen Tages-Rhythmus abweichen und zu einem etwa 26stündigen Rhythmus übergehen, der gelegentlich auch zu einem 33stündigen oder noch längeren ausbricht. Mit Hilfe eines von außen einschaltbaren und der Versuchsperson unbekanntem elektrischen Feldes von 10 Hz und 25 mV/m war es möglich, die Periodizität der Versuchsperson auf einen Rhythmus von rund 25 Stunden zurückzubringen. Dieser Versuch verdient wegen der Ausschaltung aller konkurrierenden Nebenfaktoren Beachtung.

Eine andere Studie muß wegen ihres bemerkenswerten Resultates erwähnt werden (JACOBI und KRÜSKEMPER (10)). Versuchspersonen wurden unter einer Deckenelektrode in ei-

nem klimatisierten Raum Atmosphericimpulsen ausgesetzt, die folgendermaßen definiert werden können:

Oberwellenfrequenz: einige kHz, Impulsfolge-Frequenz variabel zwischen 2, 5, 10 und 20 Hz wählbar; Feldstärke zwischen 0,2 und 0,4 V/m. Gemessen wurden die Thrombozytenadhäsivität (= Neigung zur Blutgerinnung). Die Versuche zeigten signifikante Ergebnisse und zwar: Bei Anwendung von 10 Hz Impulsfolgefrequenzen war die Blutgerinnungs-Tendenz deutlich erhöht, bei anderen Frequenzen vermindert. Die Feldstärke hatte keinen Einfluß. Die Einwirkungsdauer der atmospheric betrug jeweils 3 Stunden. Ihre Wirkung konnte durch Pharmaka abgeblockt werden. Doppelblindversuche sicherten die Ergebnisse ab, welche an 450 Personen ausgeführt worden sind. Diese Befunde sind deshalb sehr beachtenswert, weil sie zeigen, daß applizierte atmospheric am Menschen auch nachteilige, ja nicht ungefährliche Folgen haben können. Hier ist ferner auf die von LLAURADO et al. (11) herausgegebene Sammlung zum Thema biologischer und klinischer Effekte von extrem niederfrequenten, magnetischen und elektrischen Feldern hinzuweisen, welche eine Fülle von Informationen in Form kompetenter Einzelartikel enthält. Das Werk ist ausgelöst durch die Frage, ob das Navy-Kommunikations-System „Sanguine“ biologische Auswirkungen haben kann, da das Antennensystem eine Ausdehnung bis zu 1600 Meilen hat und mit Frequenzen unter 100 Hz betrieben wird, wobei die Gesamt-Energie im System 30 Megawatt und die Feldstärken unter dem Antennensystem in bewohnten Gegenden 0,1 V/m erreichen können. BAKER beschreibt Aufgabe und technische Details, ROZZELL stellt fest, daß nach den gegenwärtig vorliegenden Daten keinerlei Anzeichen von akuten Wirkungen auf Menschen, Tiere, Pflanzen oder Mikroorganismen durch schwache ELF-Felder vorliegen. Eine Reihe anderer Autoren berichtet über spezielle Untersuchungen im Frequenzbereich zwischen 7 und 75 Hz bei Feldstärken zwischen 1 und 100 V/m an Lebewesen verschiedenster Art (den Menschen eingeschlossen), auch an Arbeiten im unmittelbaren Bereich des versuchsweise in Funktion befindlichen Sanguine-Systems, wobei keine pathologischen Wirkungen zu finden waren.

Speziell mit der möglichen biologischen Wirkung extrem niederfrequenter magnetischer und elektrischer Felder haben sich GRISSETT und de LORGE (12) (13) befaßt. Die Versuche wurden an Affenarten ausgeführt (Magnetfelder zwischen 7 und 60 Hz und ca. 10^{-3} T). Es wurden keinerlei signifikante Effekte gefunden. Auch KRÜGER et al. (14) konnten keine Wirkung von elektromagnetischen ELF-Feldern finden. Sie untersuchten den Serotonin-Stoffwechsel an Mäusen bei Anwendung von 45—75 Hz und 100 V/m.

Umfassende Werke mit Ergebnisdarstellungen:

Biologische und klinische Effekte von elektrischen und magnetischen Feldern von sehr niedriger Frequenz: J. G. LLAURADO et al. (Herausgeber) (11), A. R. SHEPPARD et al. (Herausgeber) (15).

Ferner ist folgende Neuerscheinung zu erwähnen: RICHARD D. PHILLIPS (Herausgeber) (16).

1.4.3 Elektrische Felder zwischen 50 und 100 Hz

Dieser Frequenzbereich ist vor allem von technischer Seite her von Interesse. Er soll hier nur kurz angesprochen werden. Alle bis jetzt in sämtlichen Kulturländern durchgeführten Untersu-

chungen über eine mögliche Schädigung des Menschen durch Frequenzen im genannten Bereich haben zu dem Ergebnis geführt, daß Beeinträchtigungen oder Schädigungen mit Sicherheit dann auszuschließen sind, wenn die Feldstärke in der Nähe des Menschen nicht über 5 kV/m liegt. Es kann sein, daß gelegentlich unspezifische Reaktionen des Blutkreislaufes und der biochemischen Struktur des Blutes auftreten, sie liegen jedoch alle innerhalb des physiologischen Schwankungsbereiches. Jedenfalls können Frequenzanteile im genannten Bereich aus natürlichen Quellen ebenfalls mit Sicherheit als biologische Reize ausgeschlossen werden.

1.4.4 Hochfrequente Felder

Wir wollen hier grundsätzlich nicht von Frequenzen sprechen, die bereits thermische Reaktionen im Gewebe oder Augenlinsenschäden auslösen. Leider befaßt sich die vorliegende Literatur mit Rücksicht auf technische Interessen überwiegend mit der biologischen Wirkung extrem hochfrequenter Felder im Megahertz- und Gigahertz-Bereich. Im Bereich von 1 bis 100 kHz liegen kaum verlässliche Untersuchungen vor, jedoch lassen sich Schlüsse dahingehend ziehen, daß eine nachhaltige schädliche Wirksamkeit auch diese des Frequenzbereiches kaum in Betracht kommt. Wir können aber heute noch nicht ausschließen, daß die atmospheric natürlichen Ursprungs biologische Reize auslösen, jedoch lassen sich bis heute hierzu weder Beweise dafür oder dagegen finden.

2 Aerosole

2.1 Definition und Aerosolpartikelspektrum

Unter Aerosolen versteht man eine „Mischung“ von Luft mit solchen Partikeln, welche innerhalb von Stunden und Tagen kaum einer nennenswerten Sedimentation unterliegen. Dies trifft für Teilchen zu, deren Durchmesser kleiner als etwa 1 μm ist. Intensive Untersuchungen über die Größenverteilung der atmosphärischen Aerosolpartikel gehen auf JUNGE zurück und es sei deshalb auf sein grundlegendes Werk (17) hingewiesen, welches praktisch alle bis heute gültigen Fakten enthält.

An unserem Institut wurde mit einer von JUNGE und JAE-NICKE entwickelten Methode (5fach Impaktor) eine 15jährige Meßreihe in Garmisch-Partenkirchen (740 m), auf dem WANK (1780 m) und auf der Zugspitze (2964) durchgeführt, um die Steuerung des Partikelgrößenspektrums und der Partikelkonzentration durch die meteorologischen Größen zu studieren. Es ist nicht möglich, hier in Details einzugehen. Abbildung 4 zeigt nach eigenen fast täglichen Messungen die mittlere Partikelgrößenverteilung von 1970—1980 an den benachbarten Stationen Garmisch-Partenkirchen (740 m), Wankgipfel (1780 m) und Zugspitze (2964 m). Sie ist aber vom Wetter, Vertikalaustausch und Luftkörper abhängig.

Das Partikelgrößenspektrum ist von wesentlicher Bedeutung

— in der Meteorologie über die Sichtweite, da die optische Wirksamkeit im sichtbaren Bereich des Lichtes (Trübung) mit der Größe der Aerosolpartikel zunimmt.

— Hinsichtlich der biologischen Relevanz sind zwei Gesichtspunkte maßgebend: Zum einen, ob und inwieweit es sich bei Aerosolpartikeln ganz oder teilweise um toxische Komponenten handelt. Ist letzteres der Fall, so ist selbstver-

ständig Vorsicht geboten und sind spezielle Untersuchungen durchzuführen.

Der zweite Gesichtspunkt betrifft die Abscheidung der Aerosolpartikel im Atemtrakt. Die Grobpartikel (größer als $5 \mu\text{m}$) werden bereits im Nasen-Rachenraum abgeschieden und folglich leicht wieder abgegeben, die kleineren Partikel dringen in die Lunge ein („Lungengängigkeit“).

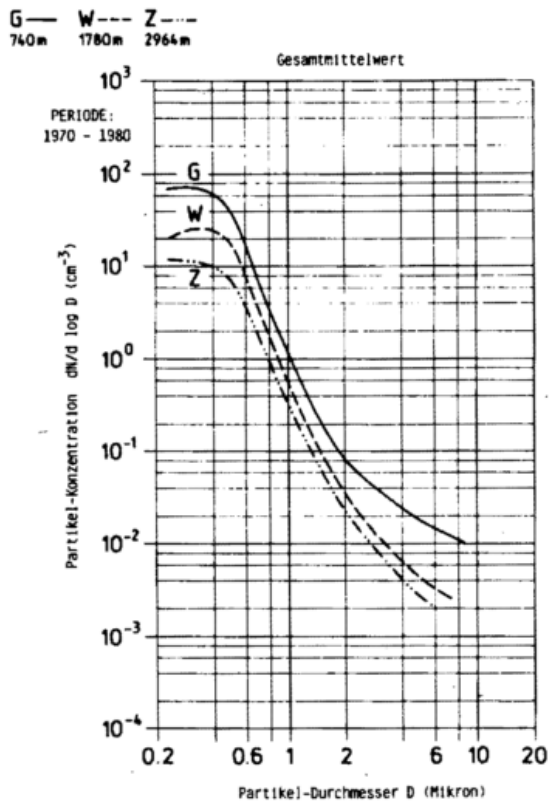


Abb. 4: Über 10 Jahre hinweg fast täglich gemessenes und über die ganze Periode gemitteltetes Aerosolpartikelspektrum an den Stationen Zugspitze (Z), Wank (W) und Garmisch-Partenkirchen (G). Es ergibt sich eine „Junge-Verteilung“, wobei aber im Bereich kleiner Partikel zwischen 0,2 und 0,4 Micron die Anzahl im Tal um eine Größenordnung höher liegt als an der Zugspitze. Bei mittleren Partikelgrößen ist die Höhendifferenz geringer, sie wird jedoch nach großen Partikeln (10 Micron) wieder signifikant: Im Tal ist die Konzentration dieser bereits als Staub zu bezeichnenden Aerosolteilchen wesentlich größer als an den beiden Bergstationen.

Die „Lungengängigkeit“ der Aerosolpartikel hängt von ihrer Größe und Masse in folgender Weise ab. Im Röhrensystem des Atemtraktes und auch in den Lungenbläschen sind zwei (wenn wir von der Sedimentation absehen) Grundvorgänge maßgebend: 1. Die Trägheitsabscheidung bei der Umlenkung der Aerosolpartikel aus der jeweiligen Richtung an den Verzweigungsstellen des Bronchialtraktes. 2. Der Diffusionsprozeß, d. h. die Abscheidung der Aerosolpartikel auf Grund ihrer Braunschen Bewegung an den Wänden der Bronchialröhren und in den Lungenbläschen. Die Wirksamkeit der Trägheitsabscheidung nimmt mit fallendem Durchmesser der Teilchen ab. Folglich werden die oberen und mittleren Luft-

wege stärker mit den größeren Partikeln belastet. Die Fein-Aerosolteilchen können den Richtungsänderungen des Luftstromes leichter folgen, weshalb die Diffusionsabscheidung bei größeren Teilchen keine Rolle spielt, aber nach kleinen Teilchen hin stark ansteigt. Das bedeutet, daß die Abscheidung der Feinstaerosole in den terminalen Bronchien und im Alveolartrakt am größten ist. Die Unterscheidung nach Feinst-, Mittel- und Grobpartikeln ist im Hinblick auf die Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung von der Größe der Teilchen besonders wichtig. Oft sind gerade Feinstaerosolteilchen (z. B. an gewissen Arbeitsplätzen der Industrie) toxischen Charakters und deshalb besonders gefährlich im Hinblick auf ihre Eindringtiefe in den Atemtrakt.

Trägt man die Abscheidefähigkeit der Aerosolpartikel gegen ihren Durchmesser auf, so findet man durchschnittlich ein Abscheideminimum bei ca. $0,5 \mu\text{m}$, von dort aus eine Zunahme der Abscheidefähigkeit nach größeren Teilchen infolge zunehmender Wirksamkeit des Impaktabscheidungsprozesses und ebenso eine Zunahme der Abscheidewahrscheinlichkeit nach kleineren Teilchen hin, wegen Zunahme der Abscheidung durch Diffusion.

Über das Verhalten von Aerosolteilchen im Atemtrakt findet man Details bei (18).

3 Ionen

3.1 Grundlagen

Unter Luft-Ionen versteht man Aerosolpartikel, welche eine elektrische Ladung tragen. Ein großer Teil der Aerosolpartikel, von denen oben die Rede war, ist elektrisch aufgeladen. Die Ladung entsteht durch Ionisationsprozesse in der Luft, ausgelöst durch kosmische Strahlung und natürliche Radioaktivität in Luft und Boden. Diese Ladungen spielen keine entscheidende Rolle, insofern die Partikel relativ groß sind. Ihr Verhalten wird durch die Ladung kaum nennenswert beeinflusst. Wir befassen uns deshalb hier mit Rücksicht auf die gebotene Kürze mit den sogenannten Klein-Ionen, da diese zu den wichtigsten luftelektrischen Parametern gehören. Sie besitzen eine hohe Beweglichkeit, welche in $\text{m}^2/\text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ausgedrückt wird. Man findet regelrechte Beweglichkeits-Spektren und zwar unterschiedlich für negativ und positiv geladene Ionen. Die durchschnittliche Beweglichkeit atmosphärischer Kleinionen beträgt bei den positiven $1,25 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ bei den negativen $1,4 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. Die Konzentration der positiven Ionen ist in der Regel etwas größer als die der negativen (besonders in Bodennähe) und schwankt zwischen etwa 100 bis wenige 1000 Kleinionen pro Kubikzentimeter und pro Vorzeichen.

Die entscheidende Bedeutung dieser Kleinionen beruht — wegen ihrer hohen Beweglichkeit — darin, daß sie den atmosphärisch-elektrischen Stromtransport bewirken. Befinden sich Kleinionen in einem statischen elektrischen Feld, so beginnen sie entsprechend ihrem Vorzeichen in der vorgegebenen Richtung zu wandern und bilden auf diese Weise den luftelektrischen Ausgleichsstrom zwischen zwei atmosphärischen Ladungen (Wolke-Erdboden z. B.) oder zwischen unterer Ionosphäre und Erdoberfläche.

Die Kleinionen haben ferner infolge ihrer hohen Beweglichkeit die Eigenschaft, sich sehr schnell an vorhandene Aerosol-

partikel anzulagern. Das bedeutet, daß die Kleinionen ein ausgezeichneter Indikator für die Luftverschmutzung sind (natürlich kein absolutes Maß dafür). Nimmt die Zahl der Aerosolteilchen zu, sinkt die Anzahl der Kleinionen ab und umgekehrt (konstante Bildungsquote vorausgesetzt). Es ist aber keinesfalls erlaubt, durch Kleinionenregistrierungen an beliebigen Orten unmittelbar auf die absolute Aerosolkonzentration (gewissermaßen die partikuläre Luftverschmutzung) zu schließen, da sich innerhalb von Wolken und Nebel die Kleinionen analog verhalten: Im Nebel lagern sich die Kleinionen mit hoher Geschwindigkeit an die Tröpfchen an. Abbildung 5 zeigt eine Registrierung der positiven und negativen Kleinionenkonzentration in einem geschlossenen Raum. Ist der Raum leer, findet man hohe Ionenkonzentrationen. Sobald der Raum benutzt wird, insbesondere dann, wenn geraucht wird, sinkt die Ionenkonzentration drastisch ab und erreicht fast Nullwerte. Im Inneren von Räumen ist die Kleinionenkonzentration in Abwesenheit von Personen größer als im Freien (Kleinionen und Meteorologie s. (5) (19)) wegen der natürlichen Radioaktivität des Baumaterials.

oder negativer Kleinionen sprechen. Die Schwankungsbreite in der Atmosphäre (3) (5) (19) ist, wie schon gesagt, sehr groß, wofür einerseits Wolken und Nebel, andererseits die Aerosolkonzentration, aber auch die Radioaktivität der Luft und die Höhe über der Erdoberfläche maßgebend sind. Der Mensch findet also je nach Aufenthaltsort ein sehr unterschiedliches Kleinionenmilieu vor. Auch der Föhn zeigt keine spezifische Abweichung der Kleinionenkonzentration gegenüber anderen Schönwetterlagen mit großer Luftreinheit (19).

4 Zusammenfassende Schlußbetrachtung

Betrachten wir das umfangreiche Gebiet der atmosphärischen Elektrizität, so können wir bis heute keiner ihrer Komponenten eine eindeutige und nachhaltige biologische Wirkung zusprechen. Es besteht höchstens eine gewisse Möglichkeit, daß elektromagnetische Wellen mit Frequenzen zwischen 5—50 kHz und 10 bis 20 Hz wirksam sein können. Man muß jedoch bedenken, daß die thermischen Faktoren (Temperatur, Feuchte, Wind, Strahlung) das Befinden des Menschen so

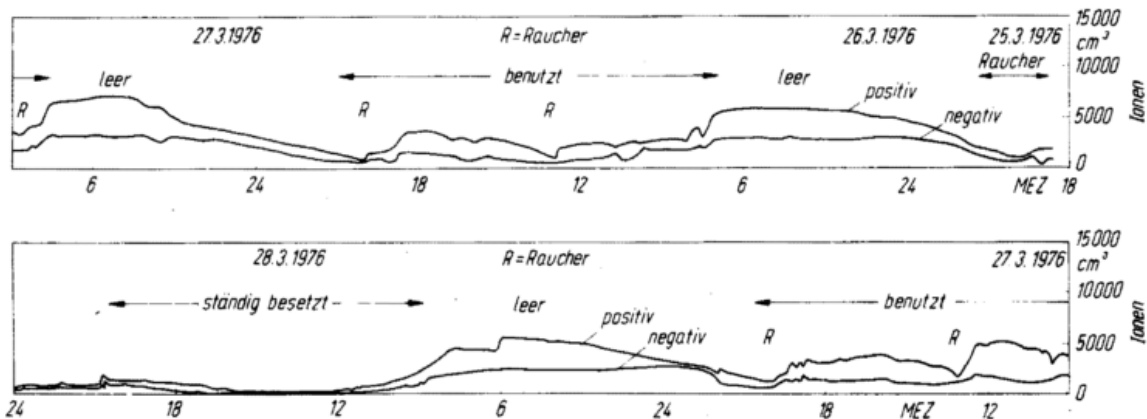


Abb. 5: Verhalten der positiven und negativen Kleinionen in einem geschlossenen Raum, der zeitweise leer war, zeitweise aber benutzt wurde, wobei R bedeutet, daß geraucht worden ist.

Am Schluß sei noch kurz erwähnt, wie man sich die Kleinionen aufgebaut zu denken hat: Sie bestehen aus einem geladenen Moleküllkern, der entweder positiv oder negativ sein kann (O_2^- , CO_4^- , NH_4^+ , H_3O^+ ; weitere Details über die Ionenphysik können aus (3) entnommen werden). Dieser Moleküllkern lagert aufgrund seiner Ladung Wassermoleküle an, die infolge ihrer Dipolstruktur mit ihrem positiven bzw. negativen Ende an den Kern gebunden sind. Die Zahl der Wassermoleküle kann 5 bis 10 pro Kleinion betragen und beeinflusst die Beweglichkeit des Ions.

3.2 Mögliche biologische Wirkungen

Alle bis heute durchgeführten wissenschaftlich anerkehbaren Untersuchungen über die mögliche biologische Wirkung von positiven oder negativen Kleinionen natürlicher bis mäßig erhöhter Konzentration auf Mensch oder Tier haben negative Ergebnisse erbracht. Es gibt bis heute keine Anhaltspunkte, welche für eine nachteilige oder fördernde Wirkung positiver

vordergründig beherrschen, daß ein luftelektrischer Parameter höchstens noch am Rande eine Nebenrolle spielen kann. Es besteht deshalb die weitere Forderung an alle Experimentatoren, bei der Durchführung von zum Thema gehörigen Untersuchungen unter allen Umständen größte Sorgfalt darauf zu lenken, die thermischen Faktoren konstant zu halten und kritisch zu überwachen.

Von diesem Gesichtspunkt aus kann auch unter keinen Umständen gefolgert werden, daß gewisse atmosphärisch-elektrische Parameter grundsätzlich zum Wohlbefinden des Menschen und zu seiner Gesundheit erforderlich seien. Alle geschäftlichen Bemühungen mit Hilfe von Generatoren für Felder, Ionen usw. in geschlossenen Räumen dem Menschen ein angenehmes, ein „besseres“ Raumklima zu verschaffen, sind nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnisse unbegründet.

Über Untersuchungen des luftelektrischen Raumklimas unter verschiedensten Bedingungen siehe (20), (21).

Literatur

- (1) HARTH, W.: Atmospherics or sferics — electromagnetic impulse radiation of atmospheric origin. *Inn. Med.* 2 (1975) S. 82.
- (2) VOLLAND, H., (Hrsg.): *Handbook of Atmospherics*. Florida: CRC-Press 1982.
- (3) DOLEZALEK, H.; REITER, R.: Electrical processes in atmospheres. *Proceedings of the 5th Int. Conf. on Atmosph. Electricity*. Darmstadt: Steinkopff-Verlag 1977. (Siehe dort auch den Übersichtsartikel von R. REITER, S. 759—809).
- (4) MAGONO, C.: *Thunderstorms*. Amsterdam: Elsevier Sc. Publ. Co. 1980.
- (5a) REITER, R.: *Felder, Ströme und Aerosole in der unteren Troposphäre*. Darmstadt: Steinkopff-Verlag 1964.
- (5b) REITER R.: Contribution to the problem of precipitation electricity. *Arch. Meteorol. Geophys. Biokl. A* 21 (1972) S. 247.
- (6) REITER, R.: Influence of natural atmospheric electricity on biological systems — facts and fallacies. Invited paper, *Int. Conf. on Biometeorology*, Osnabrück 1981 (in press: *Int. J. of Biometeorology*).
- (7a) KRÖLING, P.: Modellversuche zu elektrischen Komponenten des Klimas. Vortrag anlässlich der Feier zum 25jährigen Bestehen des Inst. f. Med. Balneologie und Klimatologie der Universität München, 28.11.1975
- (7b) KRÖLING, P.: Modellversuche zu elektrischen Komponenten des Klimas. *Z. angew. Bäder- u. Klimaheilk.* 24 (1977) S. 137
- (8) FRIEDMANN, M.: Einfluß elektrischer Felder auf Organismen. *Nachrichten d. Österr. Komitees d. CEE*, 510, 1977.
- (9a) WEVER, R.: Einfluß schwacher elektro-magnetischer Felder auf die circadiane Periodik des Menschen. *Naturwissenschaften* 1 (1968) S. 29
- (9b) WEVER, R. A.: The circadian system of man. Results of experiments under temporal isolation. In: SCHAEFER, K. E. (Ed.): *Topics in Environmental Physiology and Medicine*, XX. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag 1979.
- (10) JACOBI, E.; KRÜSKEMPER, G.: Der Einfluß simulierter Sferics (wetterbedingte, elektromagnetische Strahlungen) auf die Thrombozytenadhäsivität. *Inn. Med.* 2 (1975) S. 73.
- (11) LLAURADO, J. G.; SANCES, A.; BATOCLETTI, J. H.: *Biologic and clinical effects of low-frequency magnetic and electric fields*. Springfield/Jll.: Charles C. Thomas Publ. 1974.
- (12) GRISSETT, J. D.; DE LORGE, J.: Central-nervous-system effects as measured by reaction time in squirrel monkeys exposed for short periods to extremely low-frequency magnetic fields. *Naval Aerospace Medical Research Laboratory, Pensacola, Florida/USA* 1971.
- (13) DE LORGE, J.: Operant behavior of rhesus monkeys in the presence of extremely low frequency-low intensity magnetic and electric fields: Experiment 3. *Naval Aerospace Medical Research Laboratory, Pensacola, Florida/USA* 1973.
- (14) KRUEGER, A. P.; REED, E. J.: Biological impact of small air ions. *Science* 193 (1976) S. 1209.
- (15) SHEPPARD, A. R.; EISENBUD, M.: *Biological effects of electric and magnetic fields of extremely low frequency*. New York: New York Univ. Press 1977.
- (16) PHILLIPS, R. D.; GILLIS, M. F.; KAUNE, W.T.; MAHLUM, D. D. (Ed.): *Biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields*. Techn. Inform. Center, US Departm. of Energy, Springfield, Virginia/USA 1979.
- (17) JUNGE, Ch. E.: *Air chemistry and radioactivity*. New York: Academic Press 1963.
- (18) DAVIES, C. N. (Hrsg.): *Inhaled particles and vapours*. Oxford: Pergamon Press 1967.
- (19) REITER, R.: Das luftelektrische Erscheinungsbild des Südföhns. *Arch. Meteorol. Geophys. Biokl. A* 12 (1960) S. 72
- (20) REITER, R.: Elektrische Felder und Kleinionenkonzentration in Gebäuden verschiedenster Art und Nutzung. *Bauphysik* 2 (1980) S. 88.
- (21) REITER, R.: Feldstärken und Frequenzspektrum elektrischer Wechselfelder in Gebäuden verschiedenster Art und Nutzung. — Ein Beitrag zum Problem „Elektrisches Raumklima“, Teil II. *Bauphysik* (im Druck, erscheint 1982).

9 Grundzüge der Biometeorologie landwirtschaftlicher Nutztiere

1 Einführung

Die Biometeorologie der landwirtschaftlichen Nutztiere befaßt sich mit dem Einfluß meteorologischer Wirkungsfaktoren auf die Lebensvorgänge und Nutzleistungen unserer Haustiere. Dieser Zweig der Meteorologie stellt auf dem tierischen Sektor das Pendant zu der sich mit den Wirkungen auf den Menschen befassenden Medizinmeteorologie dar, und insofern charakterisiert auch der manchmal benutzte Begriff Veterinärmeteorologie dieses Arbeitsgebiet relativ gut.

Aus zahlreichen empirischen Einzelbeobachtungen ist bekannt, daß das Wetter psychische und physiologische Reaktionen beim Tier zu beeinflussen vermag, und es hat seit jeher Versuche gegeben, diese Zusammenhänge für eine optimale Tierhaltung zu nutzen.

Tierbiometeorologische Untersuchungen wurden bisher vorwiegend von Physiologen und Tiermedizinern durchgeführt, wobei meistens versucht wurde, zum besseren Verständnis der Kausalzusammenhänge durch Ausschaltung störender Nebenfaktoren die Einzelwirkung meteorologischer Größen auf die Reaktionen der Tiere, ihre Krankheiten und auf die Krankheitserreger unter standardisierten Bedingungen zu erfassen. Im folgenden Beitrag zur Biometeorologie der landwirtschaftlichen Nutztiere werden allgemeine Fragen dieses Arbeitsgebietes sowie spezielle Probleme des tierischen Wärmehaushalts unter besonderer Berücksichtigung des tierischen Fells und Anwendungen eines Wärmehaushaltsmodells für Behaglichkeitsaussagen diskutiert sowie klimatische Aspekte beim Transport von Schweinen angeschnitten.

2 Allgemeine Aspekte der Tier-Biometeorologie

Das Ziel der Biometeorologie der landwirtschaftlichen Nutztiere war lange Zeit ausschließlich die Erhöhung der Leistung der Tiere bzw. die Verhinderung eines klimatisch bedingten Leistungsabfalls. Aspekte des Tierschutzes gewannen erst in den letzten Jahren an Bedeutung. Für eine meteorologische Beratung bei Fragen der optimalen tierischen Produktionsbedingungen muß in erster Linie der Zusammenhang zwischen bioklimatischen und biosynoptischen Faktoren und der tierischen Leistung bekannt sein. Obwohl in letzter Zeit durch Arbeiten von HUTH et al. (1980) und VOLLMAR (1981) anhand eines sehr umfassenden Datenmaterials z. B. Beziehungen zwischen den klimatischen und biosynoptischen Bedingungen und der Milchleistung von Kühen erarbeitet wurden, sind allgemein quantitative Aussagen über die Wirkung verschiedener Wetterkonstellationen auf die Leistungsreaktionen auch bis heute schwierig. Je genauer man jedoch das Kausalsystem kennt, welches das Klima mit den Nutzleistungen verbindet, desto besser können praktische Hinweise haltungstechnischer, züchterischer, baulicher oder hygienischer Art gegeben werden. Nur wenn z. B. Erkenntnisse darüber vorliegen, welchen quantitativen Einfluß die verschiedenen Kombinationen der Klimaparameter auf den tierischen Produktions-

prozeß haben und auch die Häufigkeit des Auftretens dieser Konstellationen bekannt ist, können Maßnahmen wie z. B. der Einbau wärmegeämmter Bauteile oder unterschiedlicher Bodenarten unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten empfohlen und Beratungen gegeben werden. Die Einbeziehung von physiologischen Vorgängen erleichtert häufig das Verständnis für die Zusammenhänge und ist für die Festlegung der tatsächlichen Belastung in einem bestimmten thermischen Milieu erforderlich. Hier muß sich der Biometeorologe auf die Ergebnisse der Tierphysiologen stützen bzw. mit den entsprechenden Wissenschaftlern eng zusammenarbeiten. Dabei macht es häufig Schwierigkeiten, die Ergebnisse von Klimakammeruntersuchungen unter nicht exakt definierten Randbedingungen auf den allgemeinen Fall zu übertragen und sie mathematisch so zu formulieren, daß sie z. B. für quantitative Modellrechnungen verwendet werden können.

3 Merkmale des tierischen Wärmehaushalts

Als homoiotherme (gleichwarme) Lebewesen besitzen die landwirtschaftlichen Nutztiere die Fähigkeit, unabhängig von den Schwankungen der thermischen Umgebungsverhältnisse innerhalb gewisser Grenzen die Körpertemperatur konstant zu halten. Verantwortlich dafür ist ein Thermoregulationssystem, das die Flüsse latenter Wärme (Wasserdampfdiffusion durch die Haut und die Schweißdrüsen, feuchte Atemluft), fühlbarer Wärme (Ausatmen der auf Körpertemperatur erwärmten Luft, Wärmeabgabe durch Konvektion) und die Wärmestrahlung steuert. Der wesentliche Unterschied zum menschlichen Wärmehaushalt ist durch das Vorhandensein eines Felles oder eines Gefieders und durch voneinander verschiedene physiologische Reaktionen und Fähigkeiten gegeben, wie in Abbildung 1 anhand der Möglichkeiten zur Schweißbildung demonstriert wird.

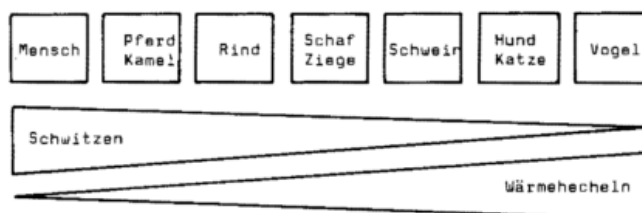


Abb. 1: Schematische Darstellung des komplementären Verhaltens von Schwitzen und Wärmehecheln bei verschiedenen Tierarten (nach BIANCA, 1976).

Schon dieses eine Beispiel zeigt, daß aufgrund der unterschiedlichen physiologischen Veranlagungen die von der Medizinmeteorologie erarbeiteten Methoden zur Behaglichkeitsfestlegung, in denen der Schwülegrad ein großes Gewicht hat, nicht ohne weiteres auf die Tiere übertragen werden können, sondern daß für jede Tierart getrennt eine Festlegung der kli-

matischen Komfortzonen erfolgen muß. Die Abbildung 2 enthält für 4 landwirtschaftliche Nutztierarten unter im Stall üblichen Bedingungen die Zone der thermischen Indifferenz und läßt erkennen, daß Jungtiere ein höheres und schmaleres Temperaturmilieu beanspruchen, d. h. daß auch die Berücksichtigung des Alters notwendig ist.

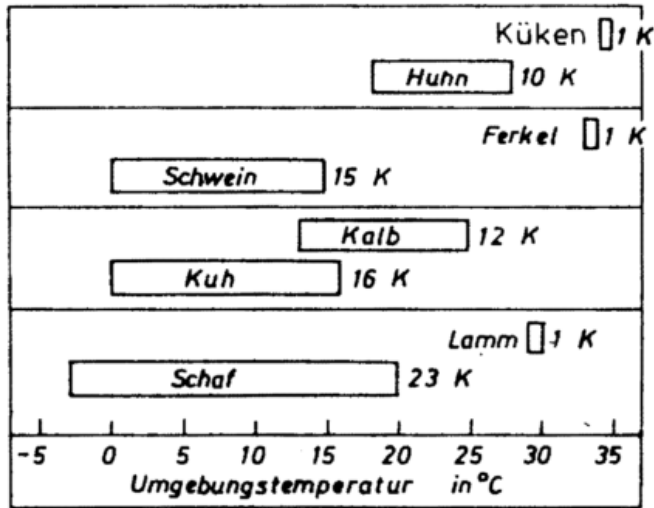


Abb. 2: Zone der thermischen Indifferenz für 4 Tierarten bei unterschiedlichem Alter für Bedingungen im Stall (nach BIANCA, 1976).

Für andere Standorte oder bei Abweichungen von den gewöhnlichen Stallbedingungen kommt es zu Verschiebungen dieser Zonen.

Allgemeine Voraussetzung für eine tierspezifische Festlegung des positiven thermischen Milieus ist, daß alle relevanten meteorologischen Größen mit der richtigen Wichtung einfließen. Dieses ist nur möglich über die Anwendung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Strahlungsaustausches sowie der Berücksichtigung der physiologischen Randbedingungen, d. h. es muß ein deterministisches Modell aufgestellt werden, das auf der Grundlage allgemeiner physikalischer Beziehungen und über den Einbau empirischer Ansätze zur Berücksichtigung der tierspezifischen Eigenschaften den Wärmehaushalt des Tieres beschreibt.

4 Prinzipien eines Wärmehaushaltsmodells für Tiere — Beispiel Rind

Grundlage eines Modells des tierischen Wärmehaushalts ist die Energiebilanzgleichung, d. h. die Aufsummierung aller den Wärmeaustausch mit der Umgebung beschreibenden Energieströme sowie der von Fütterungsniveau und Aktivität abhängigen freiwerdenden Metabolismusenergie. Die übliche Annahme, daß es sich beim Modelltierkörper um einen horizontalen Zylinder handelt, erlaubt eine einfache Handhabung der verschiedenen Energieströme. So sind z. B. für einen Zylinder die Grenzschichtwiderstände bei unterschiedlicher Anströmrichtung und für verschiedene Schichtungsverhältnisse bekannt. Die Berechnung von Formfaktoren zur Bestimmung der Körperoberflächenanteile mit Absorption direkter Strahlung in Abhängigkeit von Sonnenhöhe und -deklination lassen sich aus den geometrischen Beziehungen für Zylinder ein-

fach ableiten. Der den Wärmetransport mit der Umgebung behindernde Transportwiderstand wird bei Tieren zweckmäßig zerlegt in die hintereinandergeschalteten Widerstände Hautwiderstand, Fellwiderstand, Grenzschichtwiderstand. Im Falle der konvektiven Wärmeabgabe ergibt sich z. B. der Hautwiderstand aus der Abhängigkeit von Fettpolster und der Hautdurchblutung. Beim Strom latenter Wärme ist der Hautwiderstand ein Maß für die Fähigkeit zur Hautverdunstung (Widerstand klein bei Schweißbildung).

Über den Fellwiderstand lassen sich unterschiedlich dicke und dichte Felle sowie z. B. das Aufrichten der Haare (Piloerektion) bei Kältestreß einbauen.

Für liegende Tiere wird die zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur über die Verwendung der Lösung der eindimensionalen Bodenwärmestromgleichung zur Berechnung des Wärmeaustausches mit dem Boden benutzt. Die Bestimmung der Wärmeabgabe eines auf einem Spaltenboden liegenden Tieres erfordert eine 2- oder 3-dimensionale Betrachtung und verlangt meistens numerische Lösungsmethoden.

Die Parametrisierungen der physikalischen Vorgänge sind z. T. schon lange bekannt und in vielen Bereichen angewandt worden (MONTEITH, 1978, MOUNT, 1979) und sollen hier nicht im einzelnen diskutiert werden. Relativ wenig Quantitatives weiß man über den Einfluß des Fells auf den Strahlungshaushalt eines Tieres, der im nächsten Abschnitt näher untersucht werden soll.

5 Bedeutung eines Fells für den tierischen Strahlungshaushalt

Der Energiegewinn eines Tieres im Freien durch Strahlung kann den Energiegewinn durch Metabolismus um das Mehrfache übertreffen und darum erfordert eine sinnvolle Betrachtung des Wärmehaushalts eine sorgfältige Berücksichtigung dieses Terms. Dabei ist gerade die Berechnung dieses Teils der Energiebilanz durch das Fell sehr erschwert und darum häufig vernachlässigt worden. Während für die langwelligen Strahlungsströme die Fellhaare als schwarzer Strahler angesehen werden können, ist bei der Behandlung der kurzwelligen Strahlungsströme die Berücksichtigung von Reflexions- und Transmissionseigenschaften der Haare notwendig. Große Albedowerte eines Tierfelles verursachen zwar einerseits eine geringere Energieaufnahme des Gesamtsystems Tierkörper einschließlich Tierfell, andererseits ist eine hohe Albedo verknüpft mit hohen Transmissionswerten im Fell, wobei unter Transmission der nach vorne in Hautrichtung gestreute Anteil der kurzwelligen Sonnenstrahlung verstanden werden soll. Die Vorteile eines schwarzen im Vergleich zum weißen Fell hinsichtlich der thermischen Belastung eines in der Sonne stehenden Tieres hängen damit nicht nur von den Strahlungsbedingungen ab, sondern auch von den thermischen Eigenschaften des Fells bzw. von den Grenzschichtwiderständen. Ein bei einem schwarzen Fell in den obersten Fellschichten absorbiertes und in Wärme umgesetzter Strahlungsstrom kann bei größeren Windgeschwindigkeiten relativ leicht abgeführt werden, während bei einem weißen Fell der zwar insgesamt geringere Strahlungsanteil eine größere Eindringtiefe erreicht und ein zusätzlicher Fellwiderstand den Wärmetransport nach außen behindert.

Die zunächst trivial anmutende Frage, ob ein weißes oder ein

schwarzes Fell für ein der Sonne ausgesetztes Tier günstiger ist, entpuppt sich als ernstzunehmendes Problem, zu dem eine quantitative Antwort schwerfällt.

Die Strahlungsabsorption im Fell läßt sich über folgende Differentialgleichungen beschreiben:

$$dII = (r+k)IIpdz - rIIpdz$$

$$dII = -(r+k)IIpdz + rIIpdz$$

II = Strahlungsstrom in Richtung Haut

II = Strahlungsstrom in Richtung Felloberfläche

p = Extinktionskoeffizient des Fells

k = Absorptionskoeffizient der Haare

r = Reflexionskoeffizient der Haare

z = Felltiefe

Der Extinktionskoeffizient p hängt von der Fellart ab und läßt sich aus fellspezifischen Angaben wie Haarlänge, -dichte und -durchmesser und geometrischen Überlegungen ableiten oder durch Messungen bestimmen. Unter Berücksichtigung realistischer Randbedingungen ergibt sich für den Strahlungsstrom in Richtung Haut in Abhängigkeit von der Felltiefe z die folgende, von COWAN (1968) für die Strahlungsabsorption in Pflanzenbeständen abgeleitete, analytische Lösung:

$$II = IO/C * ((1 - t - r*rh) * \sinh(Dpz) + D * \cosh(Dpz))$$

IO = Strahlungsstrom an der Felloberfläche

t = Transmissionskoeffizient

rh = Hautreflexionskoeffizient

C = (1 - t - r*rh) * \sinh(z') + \cosh(z') * D

z' = D * p * l

l = Felllänge

D = \sqrt{(1-t)^2 - r^2}

Diese Beziehung erlaubt es, die Strahlungsdurchlässigkeit von Fellen besser zu berechnen; die Anwendung zeigt, daß nur ein geringer Strahlungsanteil sowohl beim schwarzen als auch beim weißen Rinderfell die Haut erreicht, was jedoch nicht bedeutet, daß die Wirkung auf den Wärmehaushalt gering ist.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten der Zentralen Agrarmeteorologischen Forschungsstelle des Deutschen Wetterdienstes (ZAMF) in Braunschweig zu agrarmeteorologischen Problemen der tierischen Produktion wurde u. a. versucht, quantitative Aussagen über den Einfluß der Strahlung auf den Energiehaushalt des Tierkörpers zu gewinnen. Hierzu wurden für ein Modellrind die Energiebilanzgleichungen für mehrere Fellschichten sowie die Hautoberfläche aufgestellt. Es ergibt sich ein Gleichungssystem, das z. B. nach der Zustandsgröße Temperatur aufgelöst die Temperaturverteilung im Fell sowie die Modellhauttemperatur liefert. Die Hauttemperatur ist ein gutes Maß für die thermische Belastung unter dem Einfluß verschiedener meteorologischer Größen. Sowohl physiologische Reaktionen wie Schwitzen, Hecheln, Gefäßerweiterung usw. als auch ethologische (Standortwechsel) werden bei Hauttemperaturänderungen eingeleitet (BIANCA, 1977). Die Berechnungen für unterschiedliche Randbedingungen zeigen, daß sich beim schwarzen Fell das Temperaturmaximum in den obersten Millimetern der Fellschicht einstellt, was dazu führt, daß Messungen mittels Infrarotthermometern die schwarzen Flecken am Tierkörper wärmer erscheinen lassen und dieses im Vergleich zu den weißen Flecken als größere Wärmebelastung gedeutet wird. Beim weißen Fell befindet sich das Temperaturmaximum in tieferen Schichten, aus dem die langwellige

Strahlung nicht oder nur z. T. nach außen dringt.

Ziel der Berechnungen sollte hier nicht die Absoluthauttemperatur sein, sondern vielmehr die Bestimmung ihrer Änderung durch unterschiedliche meteorologische Wirkungsgrößen, um einen Vergleich der Wirkung der einzelnen meteorologischen Parameter auf die Hauttemperatur mit der Wirkung der Lufttemperatur durchführen zu können. So lassen sich die bisher nur auf der Grundlage der Lufttemperatur oder auf der Auswahl einiger Größen beruhenden Behaglichkeitszonen quantitativ verschieben.

Durch den Vergleich der Wirkung von kurzwelliger Strahlung mit der der Lufttemperatur auf die Modellhauttemperatur bei gleichen Randbedingungen ergibt sich die Abbildung 3.

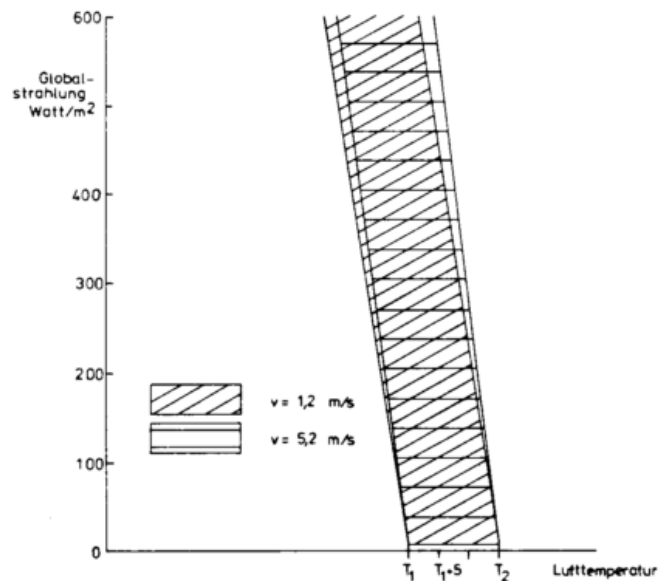


Abb. 3: Berechnete Verschiebung der Behaglichkeitszone durch kurzwellige Strahlung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten für ein schwarz-weißes Jungrind.

In der Abbildung 3 ist ausschließlich die Windwirkung auf den Abtransport der im Fell umgesetzten Strahlungsenergie berücksichtigt und nicht generell der Einfluß des Windes auf die Verschiebung der Komfortzone.

Mit der Wirkung der einzelnen meteorologischen Einflußgrößen auf den Wärmehaushalt eines Tieres ist jedoch nicht bekannt, wann diese Wirkung zu einem Diskomfort führt, d. h. es müssen tierspezifische Schwellenwerte gefunden werden, die den thermischen Behaglichkeitsbereich definieren.

6 Die Bestimmung der thermischen Behaglichkeitszone

Eine Möglichkeit zur Festlegung des thermischen Behaglichkeitsbereiches ist es, den Tieren freie Wahl zwischen Standorten mit unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen zu geben und aus dem Wahlverhalten die Behaglichkeitszone zu bestimmen. Die einzelnen thermischen Milieus müssen über einen Behaglichkeitsindex quantifiziert werden. Das Wahlverhalten bietet sich für die Festlegung der Behaglichkeitsstufen an, da die Standortveränderung als Temperaturregulation ethologi-

scher Art als „erste Verteidigungslinie“ (BIANCA, 1977) vor den physiologischen Maßnahmen eingesetzt wird. Die Berücksichtigung der relevanten Klimaparameter in richtiger Wichtung für den Behaglichkeitsindex ist dem Konzept FANGERS (1972) folgend auf der Basis der Energiebilanzgleichung möglich und wurde hier in modifizierter Form auf Tiere übertragen.

Die Energiebilanz ist ein Maß für den Komfort bzw. Diskomfort. Wärmetüberschuß, d.h. positive Energiebilanz bedeutet Unbehagen, das sich als Hitzestress äußert, Wärmedefizit bewirkt Diskomfort als Kältestress.

Um eine handliche Behaglichkeitskala zu bekommen, wird die Energiebilanz mittels einer vom Metabolismus abhängigen empirischen Funktion auf den Wertebereich -5 bis $+5$ normiert.

Die Abbildung 4 zeigt den typischen Tagesgang des Behaglichkeitsindex an einem Strahlungstag (oben) und an einem bedeckten Sommertag (unten) für 3 Standorte für Jungrinder.

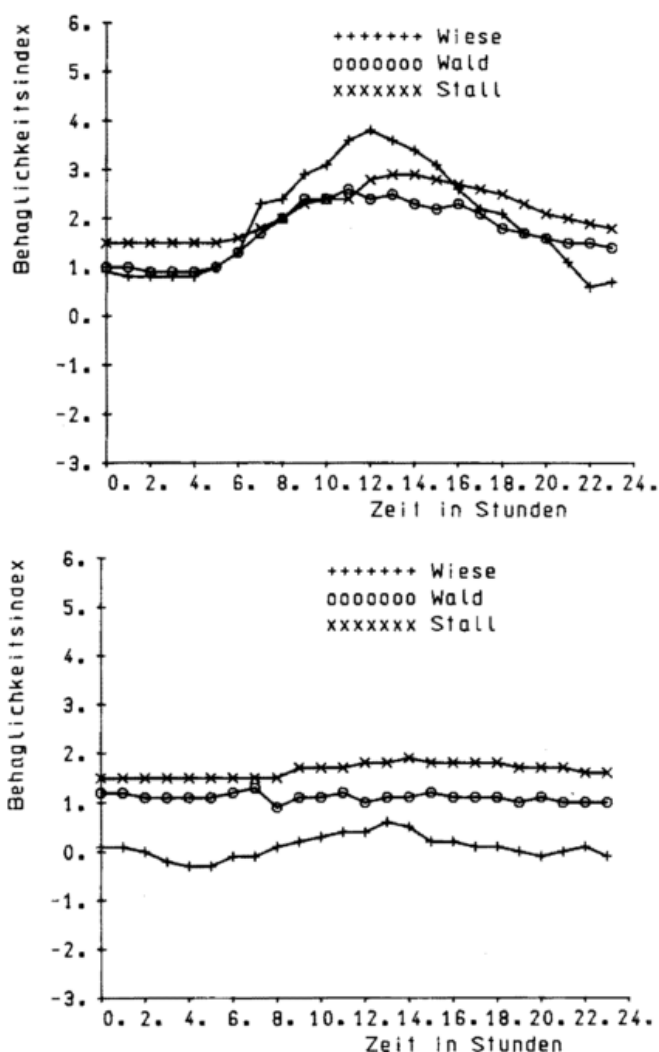


Abb. 4: Tagesgänge des Behaglichkeitsindex für die Standorte Wald, Wiese und Stall bei Jungrindern (oben: Strahlungstag, unten: bedeckter Sommertag).

Nach Festlegung der die Komfortzonen begrenzenden Schwellenwerte aus den Reaktionen der Tiere lassen sich die verschiedenen meteorologischen Konstellationen mit Komfort bzw. Diskomfort bestimmen und Behaglichkeitsdiagramme erstellen.

Über geeignete Parametrisierungen der meteorologischen Einflußgrößen und durch Sensitivity-Analysen überprüfte Vereinfachungen läßt sich die Energiebilanzgleichung so aufbauen, daß die Berechnung der Behaglichkeitsindizes in der Praxis ohne großen Rechenaufwand und auch durch weniger mit der Mathematik vertraute Wissenschaftler möglich ist.

Die klimatische Behaglichkeit muß jedoch immer im Zusammenhang mit dem möglichen psychischen und physischen Stress gesehen werden. In extremen Fällen, wie z.B. bei Tiertransporten kann der thermische Diskomfort den durch das Treiben und die ungewohnte und beengte Umgebung hervorgerufenen Stress bis zu lethalen Bedingungen erhöhen, wobei hier besonders Schweine gefährdet sind.

7 Abhängigkeit der Transportverluste bei Schlachtschweinen von den meteorologischen Bedingungen

Bedingt durch kontinuierliche Selektionsmaßnahmen in der Schweinezucht mit dem Ziel größerer Wachstumsintensität, besserer Futtermittelverwertung und höherem Schlachtkörpergewicht wurde auf Kosten der Stressanfälligkeit der Schweine ein hohes Leistungsniveau erreicht. Der Anteil des klimatisch bedingten Stresses nimmt besonders beim Transport für die häufig in klimatisierten Ställen gehaltenen Schweine eine Größenordnung an, die zu Todesfällen oder zu minderwertigem PSE-Fleisch (Pale, Soft, Exudative) führt. In Untersuchungen, die sich mit der Abhängigkeit der Transportverluste von den klimatischen Bedingungen beschäftigen, ergaben sich deutliche Zusammenhänge zwischen meteorologischen Größen und den Verlustquoten.

Anhand der Daten einer norddeutschen Tierversicherung wurden an der ZAMF die meteorologischen Bedingungen einzelner Tage mit hohen Verlusten untersucht und Korrelationen mit der Tageshöchsttemperatur durchgeführt. Die Tageshöchsttemperatur beschreibt besser als die Tagesmitteltemperatur die thermische Belastung am Tage. Außerdem ist das Temperaturmaximum gleichzeitig ein Indiz für die Strahlungsverhältnisse, denn relativ hohe Temperaturmaxima in den einzelnen Jahreszeiten werden meistens durch starke Einstrahlung verursacht.

Aufgrund der Unfähigkeit der Schweine zur Schweißproduktion (Abb. 1) kann die bei anderen Tieren in ähnlichen Situationen einsetzende kräftige Erhöhung des latenten Wärmestroms nicht in gleichem Maße erfolgen, so daß ein größerer Einfluß der Luftfeuchte nicht erwartet werden kann. Des Jahresgangs der Transportverluste mit Maximum im Sommer zeigt die Abbildung 5.

Bei der Herausarbeitung von Tagen mit extrem hohen Verlusten ergaben sich Schwellenwerte der Tageshöchsttemperatur. Infolge der geringen Gewöhnung der Tiere an eine Wärmebelastung zu Anfang des Jahres weisen auch die Schwellenwerte der Tageshöchsttemperatur einen Jahrgang auf. So reichen schon im März 16°C Temperaturmaximum aus, um die Verluste signifikant ansteigen zu lassen, während dies im Juni

z. B. erst bei 26°C beobachtet wird. Diese Zusammenhänge lassen sich mit den vorhandenen synoptischen Verfahren zur Vorhersage der Tageshöchsttemperatur für Warnungen vor Tagen mit extremen Transportverlusten verwenden. Die Häufigkeit für das Überschreiten der jeweiligen Schwellenwerte ergeben sich aus langjährigen Tageshöchsttemperaturstatistiken, wie z. B. für Braunschweig (Tab. 1).

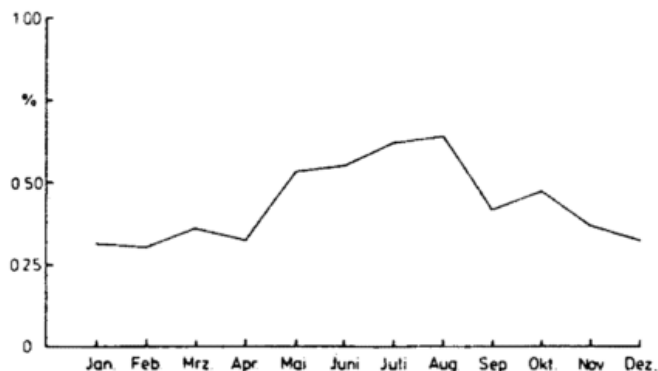


Abb. 5: Jahresgang der Transportverluste (1978—1981)

Tab. 1: Mittlere Anzahl von Tagen mit extremen Transportverlusten für Braunschweig

März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Summe
1,8	0,4	1,7	2,6	4,1	2,3	0,9	13,8

Die Zahlen der Tabelle 1 spiegeln sehr gut die aus dem vierjährigen Datenmaterial gewonnenen Ergebnisse (Abb. 5) wider. Modellrechnungen zum Wärmehaushalt des Schweins sowie Meßfahrten im Transportraum sind jedoch nötig, um differenzierte Beratungen geben zu können.

8 Ausblick

Der relativ jungen Disziplin der Biometeorologie der landwirtschaftlichen Nutztiere eröffnet sich ein sehr großes Arbeitsfeld. Schwerpunkte liegen auf den Gebieten des tierischen Wärmehaushaltes und der Tierkrankheiten. Die bessere Einbeziehung besonders der Strahlungsverhältnisse und die Berücksichtigung des Bodenwärmestromes muß ebenso angestrebt werden wie auch die verstärkte Anwendung mikrometeorologischer Prinzipien auf die ab Hautoberfläche wirkenden Vorgängen. Die Aufstellung und Anwendung deterministischer Modelle könnte enorm die Bestrebungen unterstützen, die in vielen Laboruntersuchungen herausgearbeiteten einzelnen kausalen Zusammenhänge einer komplexeren Betrachtung

zugänglich zu machen. Es muß das Ziel sein, mehr Anhaltspunkte über die wirtschaftlichen Folgen eines nicht optimalen Klimas sowohl im Freien als auch im Stall zu bekommen. Dabei spielen neben den Überlegungen zum Wärmehaushalt auch die Fragen zur Gesundheit der Tiere eine Rolle. Zahlreiche Tierkrankheiten weisen eine Abhängigkeit von den stalklimatischen Bedingungen bzw. vom Witterungsverlauf auf.

Einerseits wird über den Wärmehaushalt durch ungünstige Klimaverhältnisse eine verminderte Resistenz gegenüber pathogenen Mikroorganismen bewirkt, andererseits fördern bestimmte klimatische Bedingungen die Ausbreitung, Entwicklung oder Überlebensmöglichkeiten der Krankheitserreger.

Die Anwendung eines in Großbritannien entwickelten empirischen Vorhersageverfahrens zur Gefährdung der Rinder durch die Leberegelseuche in Schleswig-Holstein sowie erste Modellrechnung an der ZAMF in Braunschweig zur Bestimmung der Entwicklungsraten des Rundwurms *Ostertagia ostertagi*, der die wirtschaftlich bedeutende Magen-Darmwurmseuche bei Weiderindern verursacht, wie auch die Forschungsergebnisse in den angelsächsischen Ländern zeigen, daß in Zusammenarbeit mit Parasitologen und Tiermedizinern eine erfolgreiche Arbeit möglich ist, deren Ergebnisse in der agrarmeteorologischen Beratung anwendbar sind und künftig stärker als bisher berücksichtigt werden müssen, um der hohen wirtschaftlichen Bedeutung der tierischen Produktion in der Landwirtschaft gerecht zu werden.

Literatur

- BIANCA, W.: Neuzzeitliche Ergebnisse und Aufgaben der Bioklimatologie bei Haustieren. *Der Tierzüchter* 12 (1976) S. 438—442.
- BIANCA, W.: Temperaturregulation durch Verhaltensweisen bei Haustieren. *Der Tierzüchter* 29 (1977) S. 109—113.
- COWAN, I. R.: The interception and absorption of radiation in plant stands. *J. Appl. Ecol.* 5 (1968) S. 367—379.
- FANGER, P. O.: *Thermal comfort*. New York: McGraw Hill Book Company 1972.
- HUTH, F. W.; SCHUTZBAR, W.: Der Einfluß des Wetters auf die Milchleistung der Kühe. *Der Tierzüchter* 1 (1980) S. 16—23.
- MONTEITH, J. L.: *Grundzüge der Umweltphysik*. Darmstadt: Steinkopff-Verlag 1978.
- MOUNT, L. E.: *Adaptation to thermal environment*. London: Edward Arnold Verlag 1979.
- VOLLMAR, H.: *Der Einfluß des Wetters auf die Milchleistung des Rindes, dargestellt am Hamburger biometeorologischen System*. Dissertation TH Hannover, 1981.

1 Die ökologische Sicht

Die Biometeorologie beschäftigt sich definitionsgemäß mit den direkten und indirekten Wechselwirkungen zwischen Lebewesen und ihrer atmosphärischen Umwelt. Die Hereinnahme der anderen Komponenten dieser Umwelt, neben der Atmosphäre, und ihre wechselseitige Verknüpfung führt zur Ökologie. Ihr Ziel ist die Beschreibung der Beziehungen zwischen Lebewesen und ihrer Umwelt insgesamt. Die Herkunft der Ökologie aus den biologischen Wissenschaften zeigt sich in der zentralen Stellung, die den biologisch wichtigen Zusammenhängen eingeräumt wird.

2 Systeme

Die Ökologie geht von der Vorstellung aus, daß die in einem bestimmten Naturraum lebenden Organismen untereinander und mit ihrer Umwelt ein Ökosystem bilden, das als Ganzes bestimmte Verhaltensweisen zeigt, z. B. Reaktionen zum Ausgleich wechselnder Einflüsse von außen aber auch gerichtete Zustandsänderungen im Zeitablauf auf Grund interner Prozesse, bei annähernd gleichbleibenden äußeren Bedingungen. Ähnlich wie bei Vorgängen in der Atmosphäre wird nach der räumlichen Ausdehnung eine Einteilung vorgenommen, die von Mega- bis zu Nano-Systemen reicht. Eine Zusammenfassung oberhalb der Megaskala zu einem globalen System führt zu dem Begriff der Öko- oder Biosphäre. Die schematische Darstellung der einzelnen Komponenten eines Ökosystems, ihrer Wechselwirkungen und der äußeren Einflüsse, stellt selbstverständlich die belebten Organismen und hier die organische Material aufbauende grüne Pflanze in den Mittelpunkt. Von der Anordnung abgesehen entsprechen die Komponenten des Ökosystems weitgehend den Bestandteilen des in der Meteorologie verwandten Klimasystems. Ozean und Festland oder im kleineren Maßstab Boden und Wasser werden zur „Raumstruktur“ des Ökosystems. Die „Biosphäre“ hat im Klimasystem eine eingeschränkte Bedeutung und meint hauptsächlich die Vegetationsdecke der Erde, sie wird im Ökosystem als zentrale Komponente nach ihren Funktionen weiter aufgegliedert (Abb. 1).

Beim Klimasystem interessiert das Systemverhalten in Bezug auf den Zustand der Atmosphäre, beim Ökosystem ursprünglich auf die Produktion organischer Masse. Der Mensch steht am Rand, als nicht notwendige Komponente unter den Konsumenten organischen Materials (ELLENBERG, 1973) oder gar außerhalb des Systems, als Störgröße. Auch im Klimasystem steht die Tätigkeit des Menschen außerhalb, die anthropogenen Einflüsse werden unter die externen Einwirkungen gezählt, wie etwa die Schwankungen der Solarkonstanten. Der enge, einen Gegensatz Natur-Mensch oder natürlich-künstlich enthaltende Systembegriff ist für die Beschreibung der Beziehung Mensch-Umwelt nicht ausreichend. Die bessere Einbindung des Menschen in seinen gegenwärtigen Lebensformen kann durch eine gewissermaßen horizontale Erweiterung des Ökosystembegriffs auf „naturferne“ oder „urban-industrielle“ Systeme erreicht werden, noch besser aber durch

die Einführung zusätzlicher Ebenen, in denen z. B. soziale und ökonomische Komponenten untergebracht werden. Die Umweltforschung geht von einem größeren, über die bio-ökologische Auffassung hinausreichenden Systemzusammenhang aus. Ihr Interesse richtet sich zwar letztlich auf die Umwelt des Menschen; die in diesem System enthaltenen Vernetzungen sorgen aber dafür, daß der Begriff sehr weit gefaßt wird. Auch der biometeorologische Sektor der Umweltforschung, der sich mit der atmosphärischen Umwelt des Menschen beschäftigt, kennt eine ähnliche Breite der Interessen. So wird in die „Biometeorologie des Menschen“ z. T. auch die Biometeorologie der Pflanzen und Tiere, seiner belebten Umgebung, einbezogen (TROMP, 1972). Die Berücksichtigung auch der indirekten Wechselwirkungen des Menschen mit der atmosphärischen Umwelt führt dazu, daß weite Teile der Biometeorologie und ihrer Anwendungen in der Agrar-, Forst-, Gebäude- oder Stadtklimatologie als Umweltforschung angesehen werden können und auch als solche betrieben werden.

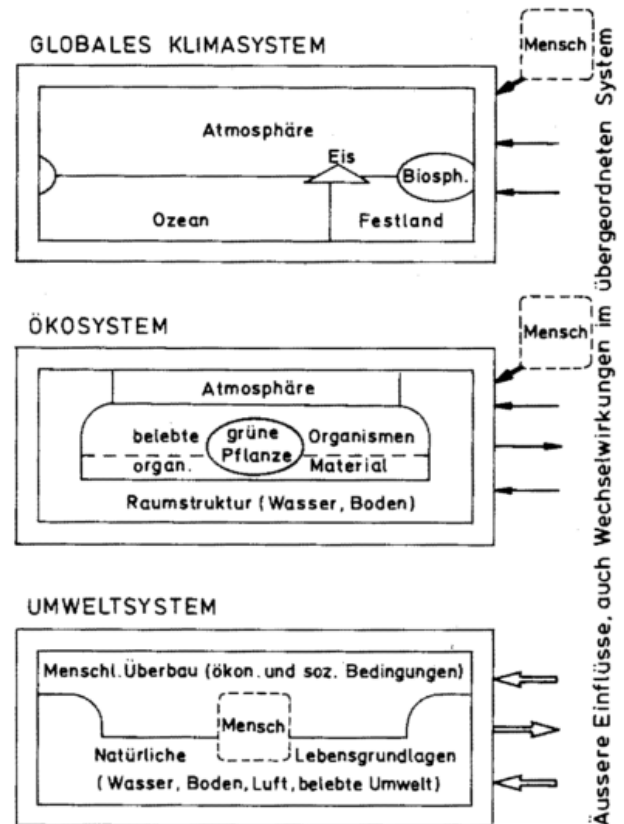


Abb. 1: Anordnung der für die Beurteilung des Systemverhaltens maßgeblichen Komponenten. Typisch für ein räumlich begrenztes Ökosystem ist die geringe, für ein Umweltsystem die starke Verflechtung mit umgebenden Systemen.

3 Entwicklung der Biometeorologie und der Umweltforschung

Im Vergleich zu der modernen Umweltforschung hat die Biometeorologie in ihrer längeren Geschichte Erfahrungen gesammelt — an der Schnittstelle zwischen den mit naturwissenschaftlichen Methoden erfassbaren Vorgängen und dem menschlichen Verhalten; in einem Bereich also, der auch in der Umweltforschung als besonders problematisch gilt. Ein Grund für die intensive Beschäftigung mit den — allerdings vorwiegend individuell gesehenen — menschlichen Reaktionen ist der starke Einfluß der Medizin auf die Entwicklung der Biometeorologie. Nicht umsonst steht der griechische Arzt HIPPOCRATES, der als Begründer und Leitbild der medizinischen Wissenschaft gilt, auch mit am Anfang der Geschichte der Biometeorologie. Insofern scheint die Referatsbezeichnung „Medizinmeteorologie“ beim Deutschen Wetterdienst berechtigt, wenn sie auch beim Außenstehenden möglicherweise zu enge Vorstellungen erweckt.

Die Umweltforschung ist erst in den vergangenen zwei Jahrzehnten zu einem Begriff geworden. Sie ist entstanden aus der wachsenden Erkenntnis einer im globalen Maßstab zunehmenden Umweltbelastung, als Folge explosiver Wachstumsprozesse. Der Umweltschutz soll diese Belastung verringern oder vermeiden helfen. Der Begriff Umweltbelastung enthält einen Doppelsinn, der zwei vorhandene Aspekte zeigt: aus der Belastung der Umwelt durch Abwasser, Abluft, feste Abfälle, Abwärme, wird eine Belastung des Menschen durch die Umwelt: eine Abgas-, Wärme-, Lärm-, Strahlenbelastung.

Es ist verständlich und gehört sozusagen zu den Kinderkrankheiten der Umweltforschung, daß sie noch zu manchen Einseitigkeiten neigt, die aus den Einflüssen der Bio-Ökologie und der Milieu-Theorie zu erklären sind. Dazu gehört die einseitige Betrachtung der Wechselwirkung Mensch-Umwelt unter dem Gesichtspunkt der Belastung und Schädigung und eine Überbewertung der Umwelteinflüsse auf das individuelle Verhalten.

4 Umweltprobleme aus biometeorologischer Sicht

Die Einwirkungen der atmosphärischen Umwelt auf den Menschen werden in der Biometeorologie zu drei Komplexen zusammengefaßt:

1. dem luftchemischen Wirkungskomplex, oder verkürzt, der Luftqualität,
2. dem thermischen und Strahlungs-Komplex,
3. dem meteorotropen Komplex, d. h. den Einwirkungen des Wetterablaufs.

Der luftchemische Komplex nimmt auch bei den Umweltbelastungen allgemein unter dem Stichwort „Luftverunreinigung“ einen vorderen Platz ein. Hauptsächlich aus Verbrennungsprozessen stammende gas- und partikelförmige Beimengungen, in einem Mischungsverhältnis um 10^{-6} , aber auch bereits in sehr geringen Anteilen (unter 10^{-9}) wahrnehmbare „Geruchsstoffe“, z. B. aus der Abwasserbehandlung oder petrochemischen Anlagen, haben unmittelbare belästigende oder gesundheitsschädliche Wirkungen auf den Menschen. Luftverunreinigungen beeinträchtigen auch die Umwelt des Menschen, in erster Linie die Vegetation, aber auch die Tierwelt, die Böden, das Wasser, schließlich auch die

vom Menschen gebaute Umwelt. Das Feld der Luftverunreinigungen hat innerhalb der Umweltprobleme einen Umfang und einen Stellenwert erreicht, der dazu geführt hat, daß Luft und Klima getrennt, als scheinbar selbständige Komponenten des Umweltsystems genannt werden (BUCHWALD/ENGELHARDT, 1978). Auch im Bundesbaugesetz wird als Planungsziel genannt: „... die Erhaltung und Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen, des Bodens, des Wassers, des Klimas und der Luft“.

4.1 Ausbreitung von Luftverunreinigungen

Innerhalb der Meteorologie haben sich bei der Beschäftigung mit Luftbeimengungen sehr spezialisierte Teilgebiete entwickelt. Die „Ausbreitungsmeteorologie“ berechnet mit zunehmend komplizierter werdenden Modellen die Verbreitung der Verunreinigungen von der Emissionsquelle bis zur Immission an einem beliebigen Ort im lokalen, regionalen oder globalen Bereich. Mit der Erweiterung der räumlichen und zeitlichen Skala der erfaßten Ausbreitungsprozesse spielen zunehmend neben dem Transport Vorgänge wie die Wechselwirkung mit der Unterlage, chemische Umwandlungen oder radioaktiver Zerfall eine Rolle, so daß auch hier größere Zusammenhänge gesehen und die Auswirkungen auf die belebte Umwelt mit einbezogen werden. Ein Beispiel ist das Phänomen der sauren Niederschläge, das sich in einem Bereich horizontaler Entfernungen um einige 10^2 bis 10^3 km im Lee von Schwefeldioxid und Stickstoffoxide emittierenden Industriekomplexen und Ballungsgebieten bemerkbar macht. Es hat weltweit Aufmerksamkeit erregt durch die Wirkung auf Oberflächengewässer in Gebieten mit kalkarmem Untergrund, wo der pH-Wert abgesenkt und im Zusammenhang damit der Fischbestand dezimiert wurde. Saure Niederschläge werden auch für flächenhaft auftretende Baumschäden, besonders in Tannenwäldern, mit verantwortlich gemacht. Meteorologisch interessant neben der Wechselwirkung mit dem kalkarmen oder kalkreichen Untergrund, ist die Neutralisation der sauren Bestandteile durch aufgewirbelten (natürlichen) Staub über kalkhaltigem Gesteins- oder Bodenmaterial. Die Folge sind z. T. basische Niederschläge, besonders im Einwirkungsbereich der Staubstürme großer Wüstengebiete wie der Sahara.

4.2 Stoffhaushalte der Atmosphäre und Biosphäre

In einem anderen Teilgebiet der Meteorologie, der Luftchemie, schien in der Phase der Bestandsaufnahme — etwa gekennzeichnet durch das Standardwerk „Air Chemistry and Radioactivity“ von CHR. E. JUNGE (1963) — der biometeorologische Ansatz zunächst zurückgedrängt. Mit der Erweiterung der Kenntnisse trat auch in der Luftchemie die Wechselwirkung mit der „Biosphäre“ (im Sinne des Klimasystems) immer mehr in den Vordergrund. In *promet* 5 (1975), H. 2 u. 3, werden die Stoffhaushalte der Atmosphäre mit ihrem biologischen Anteil und speziell den anthropogenen Einflüssen dargestellt. Dieser Weg wird in anderen Veröffentlichungen fortgesetzt (H. U. DÜTSCH, 1978). Das von der Luftchemie erschlossene Arbeitsgebiet enthält einige der am meisten diskutierten globalen Umweltprobleme: Da ist zunächst die Vermehrung des CO_2 -Gehalts der Atmosphäre von etwa 295 ppm gegen Ende des vorigen Jahrhunderts auf gegenwärtig fast

340 ppm. Als wesentliche Ursache wird nicht allein der Verbrauch fossiler Brennstoffe angenommen, auch der Rückgang der Biomasse — etwa durch Abholzen tropischer Urwälder — und der organischen Substanz in den landwirtschaftlich genutzten Böden wird in Betracht gezogen. Das atmosphärische CO₂ muß im Zusammenhang mit dem gesamten Haushalt des Kohlenstoffs gesehen werden, der eine Schlüsselrolle als Stoffbestandteil in der Biosphäre spielt (BOLIN u. a., 1979). Die erwarteten oder befürchteten Folgen einer weiteren Steigerung des atmosphärischen CO₂-Gehalts sind allerdings nicht direkt stofflicher Art. Als Folge der Einflüsse auf den Strahlungshaushalt wird etwa bei einem Anstieg des CO₂-Gehalts auf 450 ppm eine globale Erhöhung der Lufttemperatur um 1 bis 1,5 K abgeschätzt, die zusätzlich noch breitenabhängig ist. Diese Erwärmung hätte in Verbindung mit den gleichzeitig eintretenden Änderungen der Niederschlagsverteilung bereits erhebliche Folgen für die natürliche Vegetation und die landwirtschaftliche Produktion. Die teils positive, teils negative Veränderung der menschlichen Lebensräume könnte, besonders im Falle einer noch weitergehenden Klimaänderung, leicht zu katastrophalen wirtschaftlichen und politischen Entwicklungen führen.

Ein anderes Spurengas in der Atmosphäre, das Ozon, hat in einer früheren Phase der Biometeorologie eine allerdings immer umstrittene Rolle gespielt als „Agens“, als wirksamer Faktor, innerhalb des meteorotropen Wirkungskomplexes. Als Umweltproblem tritt das Ozon in verschiedenem Zusammenhang auf. Als Bestandteil des „photochemischen Smogs“ in Großstädten entsteht es unter der Einwirkung der Sonnenstrahlung in einer mit Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen angereicherten bodennahen Atmosphäre. Die Festlegung von Grenzwerten im Hinblick auf die direkte Einwirkung auf den Menschen oder auf Pflanzen hat sich als besonders schwierig erwiesen: einmal wegen der die Wirkung verstärkenden Begleitstoffe des Ozons im photochemischen Smog, zum anderen wegen der episodenhaft auch in Bodennähe auftretenden hohen „natürlichen“ Ozonkonzentrationen, welche die angestrebten Kurzzeitgrenzwerte zum Teil überschritten:

Das eigentliche „Ozonproblem“ ist jedoch die befürchtete Störung des Gleichgewichts zwischen Ozonaufbau und -abbau in der Stratosphäre, wo der Gehalt in der sogenannten Ozonschicht 1 bis 10 ppm erreicht. Als Ursachen werden Verunreinigungen der Stratosphäre angenommen, durch die Abgase von hochfliegenden Überschallflugzeugen, durch die in der Troposphäre sich nicht zersetzenden Fluor-Chlorkohlenwasserstoffe aus Sprühdosen und Kühlaggregaten oder schließlich durch Stickstoffoxide, die im Boden unter dem Einfluß der künstlichen Düngung vermehrt gebildet und an die Atmosphäre abgegeben werden. Als Folgen einer Verminderung des Ozongehalts in der Stratosphäre und der Zunahme der Intensität der biologisch wirksamen UV-Strahlung in Erdbodennähe (mit Wellenlängen < 300 nm) wird eine Zunahme der spezifischen Schädigungen — z. B. der Hautkrebsfälle — befürchtet. Im Gegensatz zum Kohlendioxidanstieg ist aus den Messungen ein tatsächlicher Abwärtstrend der Ozonkonzentrationen oder eine Auswirkung der in einigen Ländern getroffenen Maßnahmen zur Minderung der Emission von Fluor-Chlorkohlenwasserstoffen, nur sehr schwer nachzuweisen.

4.3 Globale und lokale Probleme

Die genannten drei globalen Probleme mit ihren biometeorologischen Aspekten: Saurer Niederschlag, Kohlendioxid und Ozon haben auch in den internationalen Umwelt- und Klimaprogrammen eine hohe Priorität (DWD, 1979; CEQ, 1981). Im nationalen Rahmen, z. B. im Klimaforschungsprogramm der Bundesregierung, werden auch regional begrenzt auftretende Probleme stärker betont, z. B. die biometeorologischen Beziehungen in einem städtisch-industriell ausgeprägten Umweltsystem. Die atmosphärische Umwelt, insbesondere die Luftqualität und die thermischen Bedingungen sind hier lokal sehr stark abgewandelt.

Als lokal begrenzt auftretendes Umweltproblem wird der Lärm in der Umweltforschung zum Teil ziemlich kurz abgehandelt, obwohl er für den Stadtbewohner meist an erster Stelle der Umweltbelastungen steht, denn im Gegensatz zu manchen gasförmigen Luftverunreinigungen wird der Lärm wahrgenommen. Er ist ein Musterbeispiel dafür, wie derselbe (Schall-)Reiz in der subjektiven Verarbeitung zu einer angenehmen oder zu einer höchst unangenehmen Empfindung werden kann. Von seinem Ausbreitungsmedium her, der Atmosphäre, ist der Lärm als „Luftverunreinigung durch Schall“ ein meteorologisches Umweltproblem (FORTAK, 1971/1982), zumal die Lärmbelastung häufig — etwa in der Nähe von Verkehrsstraßen — mit der Belastung durch gas- und partikelförmige Luftverunreinigungen verkoppelt ist. In der biometeorologischen Bewertung der Wirkungen sind wegen dieser Abhängigkeiten beide Belastungsarten gemeinsam zu betrachten.

5 Ausblick

Fachverbindende Arbeitsgebiete wie die Biometeorologie schaffen einen notwendigen Ausgleich zu der wachsenden Spezialisierung und Abgrenzung der einzelnen mehr oder weniger klassischen Wissenschaftszweige. Mit einer eigenen Internationalen Gesellschaft, seit mehr als 25 Jahren, und einer umfangreichen Literatur in Fachzeitschriften und Buchveröffentlichungen hat die Biometeorologie als Fach einen angemessenen Stand erreicht. Daß sie ihren interdisziplinären Charakter bewahrt und sich nicht selbst in Spezialgebiete weiterentwickelt hat, verdankt sie nicht zuletzt dem Fehlen eines eigenen Ausbildungsgangs und Berufsbilds. Dies gilt auch für Anwendungsgebiete wie die Agrarmeteorologie. Trotz der auf der einen Seite zweifellos notwendigen und erfolgreichen Spezialisierung ist die agrarmeteorologische Forschung für eine mit dem Begriff „Umwelt“ verbundene noch breitere Arbeitsweise offen geblieben. Der Verzicht auf eine eigene Ausbildung sollte allerdings durch eine Beschäftigung mit biometeorologischen Themen in den vorhandenen Studiengängen ausgeglichen werden.

Auch in der Umweltforschung allgemein würde eine professionelle Abgrenzung dem eigentlichen Ziel entgegenwirken. In der Ausbildung sind spezialisierte Studiengänge mit dem Ziel Umweltschutzingenieur die Ausnahme und meist auf Fachhochschulen begrenzt. Wie die Biometeorologie erhält die Umweltforschung insgesamt ihre Anstöße aus dem Zusammentreffen verschiedener Fachwissenschaften.

Literatur

- BOLIN, B.; DEGENS, E. T.; KEMPE, S.; KETNER, P.:
The global carbon cycle. Chichester 1979.
- BUCHWALD, K.; ENGELHARDT, W. (Hrsg.): Handbuch
für Planung, Gestaltung und Schutz der Umwelt, Bd. 1 u.
2, München, 1978.
- Council of Environmental Quality (CEQ) u. State Depart-
ment: Global future, time to act. Washington 1981.
- DEUTSCHER WETTERDIENST: Das Welt-Klima-Pro-
gramm. Offenbach 1979.

- DÜTSCH, H. U. (Hrsg.): Influence of the biosphere on the
atmosphere. Basel 1978.
- ELLENBERG, H. (Hrsg.): Ökosystemforschung. Berlin
1973.
- FORTAK, H.: Meteorologie. 2. Aufl. Berlin 1982.
- JUNGE, CHR. E.: Air chemistry and radioactivity. New
York 1963.
- TROMP, S. W. (Hrsg.): Progress in human biometeorology.
The effect of weather and climate on man and his living en-
vironment. Amsterdam 1972.

Institute stellen sich vor

Abteilung Klimatologie des Chemischen Untersuchungsamtes der Landeshauptstadt Stuttgart

Die Luftqualität in Stadtgebieten hängt nicht nur davon ab, welche Mengen luftverunreinigender Stoffe anfallen. Auch die Siedlungsstruktur sowie die topographische und meteorologische Situation sind für die lufthygienischen Verhältnisse bedeutsam. In einer Reihe städtischer Ballungsräume sind als Folge von Baumaßnahmen in den letzten Jahrzehnten Klimaverschlechterungen aufgetreten, die eine verminderte Stadtdurchlüftung und damit auch eine höhere Belastung der Bevölkerung durch Abgase und Staub zur Folge haben.

Dieser Aspekt der Stadtklimatologie findet seit einigen Jahren, vor allem in klimatisch ungünstig gelegenen Stadtregionen im Interesse von Gesundheit und Wohlbefinden der Bevölkerung verstärkte Aufmerksamkeit. So haben nicht zuletzt meteorologische Untersuchungen die Notwendigkeit untermauert, mit dem Instrumentarium der Stadt- und Regionalplanung nachteiligen Veränderungen der atmosphärischen Umwelt zu begegnen. In diesem Sinne fordert das Bundesbaugesetz in der Fassung vom 18. August 1976, daß bei der Aufstellung von Flächennutzungsplänen und Bebauungsplänen unter anderem die Belange des Umweltschutzes sowie die Erhaltung und Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen, insbesondere des Bodens, des Wassers, des Klimas und der Luft berücksichtigt werden.

Damit finden sich die Begriffe „Luft“ und „Klima“ in den Rang wichtiger Planungsfaktoren erhoben, und man sollte annehmen, daß eine Mitwirkung meteorologischen Fachpersonals bei der in kommunaler Zuständigkeit liegenden Bauleitplanung nicht nur auf wenige Städte als Einzelfälle beschränkt ist. Dies entspricht jedoch leider

dem derzeitigen Stand der Dinge, da die Belange von Luft und Klima bei raumbedeutsamen Planungen überwiegend von Vertretern anderer Wissensgebiete, z. B. Rechtswissenschaft, Architektur, Geographie und Landschaftsplanung behandelt werden.

Eine bemerkenswerte Sonderstellung nimmt in ihrer organisatorischen Eigenart die Stuttgarter Praxis ein. In Stuttgart existiert bereits seit den ersten Nachkriegsjahren beim Chemischen Untersuchungsamt eine Abteilung für Fragen des Stadtklimas, der Lufthygiene und Lärmbekämpfung, die seit 1951 — zunächst vertreten durch einen Diplom-Meteorologen und einen Chemotechniker als Mitarbeiter — voll in den kommunalen Planungs- und Genehmigungsprozeß integriert ist, ohne gegenüber den Planern weisungsgebunden zu sein.

Nicht ohne Grund hat man in Stuttgart dem Stadtklima schon frühzeitig Aufmerksamkeit gewidmet, denn die thermische Gunst dieser Klimaregion darf nicht über besondere klimatische Probleme hinwegtäuschen. Sie betreffen vorwiegend die Austauschbarkeit und damit die Stadtbeflüftung und das Empfinden von Schwüle. Ferner verursacht die starke topographische Gliederung des Stadtgebietes mit Höhenunterschieden von mehr als 300 m lokale Windsysteme. Damit bedeutet die Kenntnis des kleinräumigen Luftaustausches eine wichtige Grundlage für die Stadtplanung.

Die Entwicklung der Abteilung Klimatologie spiegelt die wachsende Bedeutung des Umweltschutzes wider in Verbindung mit dem schnellen technisch-wirtschaftlichen Aufschwung des industriellen Verdichtungsraumes um Stuttgart und mit dem gestiegenen Anspruchsniveau und Umweltbewußtsein

der Bevölkerung sowie im Zusammenhang mit der durch diese Entwicklung bedingten Vervollständigung des Immissionsschutzrechtes.

Nach dem Kriege bildeten hauptsächlich die Bearbeitung von Nachbarschaftsbeschwerden und die Überprüfung unzulänglicher Heizungsanlagen mit durch Kriegseinwirkungen schadhafte gewordenen Kaminen den Aufgabenbereich dieser Abteilung des Chemischen Untersuchungsamtes. Im Laufe der nächsten Jahre kamen mehr lufthygienische, stadtklimatische und stadtplanerische Aufgaben dazu. Hier wäre das Mitwirken bei der Aufstellung des Generalbebauungsplanes zu erwähnen, dann das laufende Überprüfen mittelgroßer privater Müllverbrennungsanlagen und Staubemissionsmessungen an Kaminen von Industrieanlagen und Kraftwerken.

Zu den anlagenbezogenen Schadgas- und Staubmessungen traten im Zusammenhang mit Stellungnahmen zu Bebauungsplänen langzeitige Pegelmessungen und gebietsbezogene meteorologische Untersuchungen hinzu. Die Vielzahl hinsichtlich des Aspektes Heizung, Klima, Lüftung und bzgl. möglicher Einwirkungen auf die Nachbarschaft zu behandelnder Baugesuche erforderte schließlich die Einstellung eines Ingenieurs. Zur Bewältigung einer steigenden Anzahl von Lärm- und Schadgasmessungen, meteorologischen Messungen zu Fragen des Stadtklimas und auch des Raumklimas, mußte das technische Personal auf den heutigen Stand von drei Mitarbeitern erhöht werden, die auch die Wartung der Meßgeräte übernehmen.

Auch nahm die Öffentlichkeitsarbeit einen größeren Raum ein in Form von Auskünften, Beratungsgesprächen, Anleitungen zu

wissenschaftlichen Arbeiten, Vorträgen, Veröffentlichungen und Berichterstattungen im Gemeinderat, Bezirksbeiräten und in den Fachgremien.

In diesem Zusammenhang sei auf den populärwissenschaftlichen Film „Stadtklimatologie am Beispiel Stuttgart“ hingewiesen, der vom Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau als Beitrag der Bundesregierung zur UN-Konferenz „Habitat“ in Vancouver 1976 in Auftrag gegeben wurde und darauf abzielte, die Probleme des Stadtklimas aufzuzeigen und zu ähnlichen Untersuchungen wie in Stuttgart anzuregen.

Auch hat in Stuttgart 1981 eine größere Ausstellung der Abteilung Klimatologie stattgefunden, die über den Zusammenhang von „Luft“ und „Klima“ informiert hat.

Seit 1968 wird die Abteilung in zunehmendem Maße mit grundsätzlichen, anwendungsorientierten Fragen einer klimagerechten Stadtentwicklung befaßt.

Derzeit sind in der Abteilung Klimatologie 3 Meteorologen, 1 Physiker, 1 Ingenieur und 3 Techniker beschäftigt.

Das Aufgabenspektrum umfaßt nunmehr:

- Die Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen zu Fragen des Immissions-schutzes und des Stadtklimas für die speziellen Gegebenheiten Stuttgarts. Hierzu ten-Meßstationen (Abb. 1), die neben den Schadgaskomponenten Schwefeldioxid, Schadgaskomponenten Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenmonoxid und Staub auch meteorologische Größen erfassen, sowie mehrere Meßpunkte für nur einzelne dieser Komponenten, zudem ein Staubbiederschlagsmeßnetz mit ca. 60 Meßstellen.

- Im Bereich der städtebaulichen Planung hat sich die Zusammenschau von akustischen und lufthygienischen Fragestellungen als notwendig erwiesen, weshalb die Abteilung auch auf dem Sektor der Lärmerfassung und Lärmbekämpfung arbeitet. Derzeit wird eine Lärmkarte von Stuttgart auf der Grundlage von Messungen erstellt. Hierzu werden zusätzlich 2 Techniker mit Zeitverträgen beschäftigt.
- Beratungen und wissenschaftliche Gutachten zum Stadtklima, zur Lufthygiene und Lärmbekämpfung mit Immissionsprognosen für Lärm und Luftschadstoffe (Ausbreitungsrechnungen, Ermittlung von Schornsteinmindesthöhen etc.).
- Stellungnahmen zu Bauleitplänen bei der Anhörung von Trägern öffentlicher Belange nach dem Bundesbaugesetz, zu Planfeststellungsverfahren und zu Sanierungsvorhaben nach dem Städtebauförderungsgesetz.
- Beurteilung genehmigungsbedürftiger Anlagen, Empfehlungen von Auflagen bzw. nachträglichen Anordnungen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz. In diesem Zusammenhang auch Bearbeitung von Nachbarschaftsbeschwerden.
- Prüfung von Baugesuchen hinsichtlich Heizungs-, Klima- und Lüftungsanlagen.

Zur Auswertung aller anfallenden Meßdaten steht der Abteilung ein eigener Rechner (PDP 11) mit Plotter zur Verfügung.

Wie man der Abbildung 2 entnehmen kann, kommen die meisten Aufträge innerhalb der Stadtverwaltung vom Stadtplanungsamt bzw. Amt für öffentliche Ordnung, was die besondere Verknüpfung der Stadtklimatolo-

gie mit planungsrechtlichen, baurechtlichen und immissionsschutzrechtlichen Fragestellungen demonstriert. Zum anderen wird aus der Abbildung die Vielfalt des kommunalen Aufgabengebietes deutlich.

Die künftigen Bemühungen der Abteilung Klimatologie des Chemischen Untersuchungsamtes auf dem Gebiet des kommunalen Umweltschutzes werden sich darauf konzentrieren, weitere Kenntnis zu erhalten über die räumliche und zeitliche Verteilung von Luftschadstoffen in Stuttgart. Dazu sollen in Zusammenarbeit mit der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg das Immissionsmeßnetz ergänzt und unter Mitwirkung des Deutschen Wetterdienstes Vertikalsondierungen der Stadtatmosphäre vorgenommen werden. Zur Vervollständigung der technischen Ausrüstung wird derzeit ein Fahrzeug für Immissionsmessungen ausgebaut. Es steht Ende des Jahres 1982 zur Verfügung.

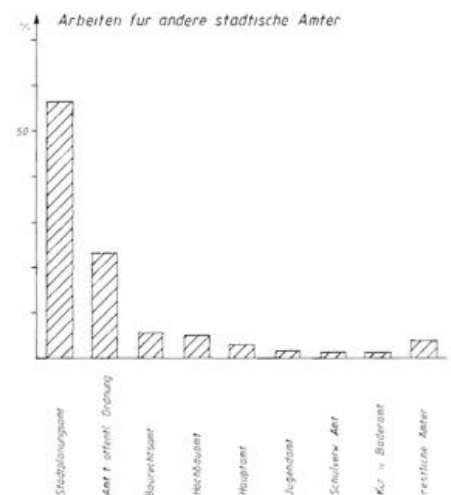
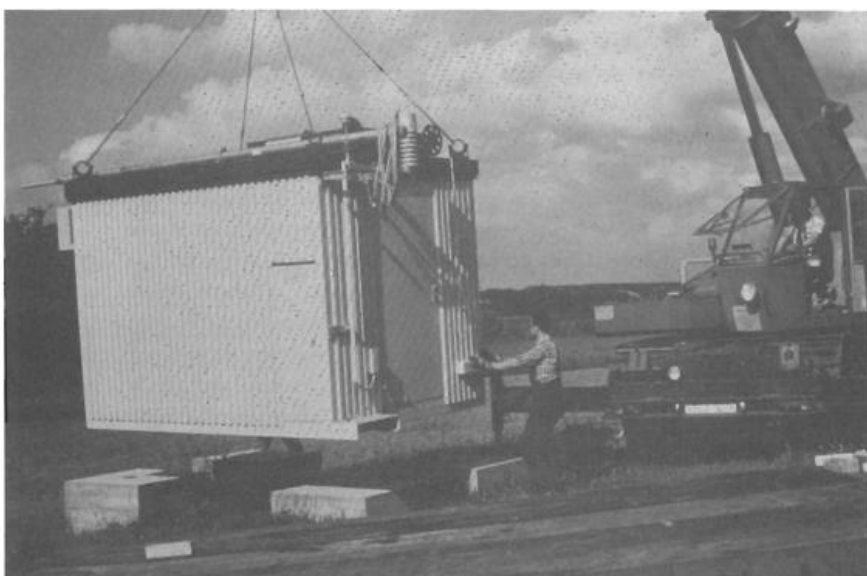


Abb. 2: Arbeiten für andere städtische Ämter



Eine weitere wichtige Aufgabe der Abteilung Klimatologie auf dem Gebiet der Raumordnung nach lufthygienischen Gesichtspunkten ist aus der Einbeziehung Stuttgarts in den Nachbarschaftsverband erwachsen, da hier die Flächennutzungspläne aufeinander abzustimmen sind.

J. BAUMÜLLER, U. HOFFMANN und U. REUTER

Landeshauptstadt Stuttgart
Chemisches Untersuchungsamt
Staffenbergstraße 81
7000 Stuttgart 1

Abb. 1: Mobile Umweltmeßstation

Blick zurück

30 Jahre Deutscher Wetterdienst

Vor 30 Jahren, am 11. 11. 1952, wurde der Deutsche Wetterdienst als Bundesbehörde aus der Taufe gehoben, nachdem die Abgeordneten des Deutschen Bundestages und Bundesrates zuvor das „Gesetz über den Deutschen Wetterdienst“ verabschiedet hatten.

Der neue Dienst baute auf den Wetterdiensten auf, die sich nach Kriegsende in den Besatzungszonen der westlichen Alliierten aus dem früheren Reichswetterdienst entwickelt hatten. Das waren in der Britischen Besatzungszone das „Meteorologische Amt für Nordwestdeutschland“, dessen Zentralamt seinen Sitz in Hamburg in der ehemaligen Deutschen Seewarte hatte, in der Amerikanischen Besatzungszone der „Deutsche Wetterdienst in der US-Zone“ mit Sitz in Bad Kissingen und in der Französischen Besatzungszone die drei Länderwetterdienste in Rheinland-Pfalz mit Sitz in Neustadt/Weinstraße, in Württemberg-Hohenzollern mit Sitz in Tübingen und in Baden mit Sitz in Freiburg. Die letzteren waren 1949 aus einem Zonenwetterdienst mit Sitz in Seelbach bei Lahr in Baden entstanden.

Mit dem Inkrafttreten des Wetterdienstgesetzes am 29. 11. 1952 gab es 7 Jahre nach dem Ende des zweiten Weltkrieges einen bundeseinheitlichen Wetterdienst, der in die Bun-

desverkehrsverwaltung eingegliedert wurde. Das Gesetz bestimmt auch die Aufgaben des Wetterdienstes. Er hat die gesamte Palette der meteorologischen Versorgung der Öffentlichkeit wahrzunehmen, die von der Weitergabe von Wetterbeobachtungen über die gezielte meteorologische Beratung aller Sparten des öffentlichen und wirtschaftlichen Lebens bis zur Erstellung von klimatologischen Großgutachten für die Standort- und Regionalplanung reicht. Ferner hat er die Aufgabe, durch Forschungsarbeiten die Erkenntnisse auf dem Gebiet der Meteorologie zu fördern, an der internationalen Zusammenarbeit teilzunehmen und die sich daraus ergebenden Verpflichtungen zu erfüllen. Zweimal wurden bisher durch Gesetzesänderung die Aufgaben des Dienstes erweitert: 1955 kam die Überwachung der Atmosphäre auf radioaktive Beimengungen und deren Verfrachtung hinzu und 1959 wurde dem Dienst die meteorologische Versorgung des zur Bundesrepublik Deutschland gekommenen Saarlandes übertragen. Eine dritte Änderung des Gesetzes steht jetzt bevor, mit der dem Wetterdienst die Bearbeitung der meteorologischen Probleme des Umweltschutzes übertragen werden soll.

Von Jahr zu Jahr wurden die Leistungen des Deutschen Wetterdienstes im In- und Ausland stärker in Anspruch genommen. Mit ei-

nem Personalbestand, der sich gegenüber 1952 kaum geändert hat, wird ein Arbeitsvolumen bewältigt, das je nach Sparte bis zum 15fachen seit Schaffung des Dienstes zugenommen hat. Dies konnte nur unter Ausnutzung aller zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten geschehen. Die Flut der aus aller Welt kommenden Daten kann heute nur noch mit modernsten elektronischen Datenverarbeitungsanlagen ausgewertet werden. Deswegen ist jetzt die Anschaffung einer neuen Großrechenanlage in Planung. Den Datenein- und -ausgang steuert eine automatische Fernmelde-Speichervermittlung, die täglich einen Umschlag von ca. 76 Mio Zeichen hat.

Durch den Einsatz der Elektronik und durch die ständige Verbesserung der mathematisch-physikalischen Modelle zur Berechnung der atmosphärischen Vorgänge ist es u. a. gelungen, eine für Planungszwecke brauchbare Vorhersage der Wetterentwicklung für die nächsten 6 Tage zu erstellen. Aber auch hier bleibt die Arbeit nicht stehen, gemeinsam mit den meteorologischen Diensten anderer Staaten arbeitet der Deutsche Wetterdienst weiter an der Erforschung der atmosphärischen Vorgänge und an der Verbesserung ihrer Vorhersage, um der Öffentlichkeit und der Wirtschaft noch besser nutzen zu können.

Neuerscheinungen

HALTINER, G. J.; WILLIAMS, R. T.:

Numerical prediction and dynamic meteorology. 2. ed. New York (usw.): Wiley 1980. XVII, 477 S. ISBN 0-471-05971-4.

RILEY, D.; SPOLTON, L.:

World weather and climate. 2. ed. Cambridge (usw.): Cambridge Univ. Pr. 1981. IV, 127 S. ISBN 0-521-28442-2.

VARGA, A.:

Grundzüge der Elektro-Bio-Klimatologie. Mit bes. Berücks. d. Umwelthygiene. Heidelberg: Verl. f. Med. E. Fischer. 1981. 416 S., 1 Faltbl. Abb. ISBN 3-88463-009-1.

GILL, A. E.:

Atmosphere-ocean dynamics. New York (usw.): Academic Pr. 1982. XVII, 662 S. = Int. Geophys. Ser. Vol. 30. ISBN 0-12-283520-4.

SAUVAGEOT, H.:

Radarmétéorologie, Télédétection active de l'atmosphère. Paris: Eyrolles 1982. XIV, 296 S. = Coll. tech. et sci. des télécommunications.

ROCZNIK, K.:

Wetter und Klima in Deutschland. Ein meteorologisches Jahreszeitenbuch mit aktuellen Wetterthemen. Stuttgart: S. Hirzel 1982. 148 S. ISBN 3-7776-0382-1.

LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J.:

The atmosphere. An introduction to meteorology. 2. ed. Englewood Cliffs/NJ: Prentice-Hall 1982. XVII, 478 S., 8 farb. S. Bildtaf. ISBN 0-13-050120-4.

SARGENT, F., II:

Hippocratic heritage. A history of ideas about weather and human health. New York (usw.): Pergamon Pr. 1982. XLII, 581 S. = Pergamon Int. Libr. of Sci. Technol. Engng. Soc. Stud. ISBN 0-08-028790-5.

BOWER, F. A.; WARD, R. B. (Ed.):

Stratospheric ozone and man. Vol. 1.2. Boca Raton/FL: CRC Press Inc. 1982. XIII, 217 S.; XIII, 263 S. ISBN 0-8493-5753-5; 0-8493-5755-1.

Habilitationen, Promotionen und Diplom-Hauptprüfungen an den Universitäten der Bundesrepublik Deutschland und West Berlins im Jahre 1981

Freie Universität Berlin

Promotionen

KLINKER, E.: Die numerische Simulation der nahezu zweijährigen Schwingung des mittleren zonalen Windes in der äquatorialen Stratosphäre.

ROSE, K.: Die Dynamik der mittleren Stratosphäre im Winter, dargestellt mit Hilfe der Haushaltsgleichungen für den Drehimpuls und sein Quadrat.

PANTOGLOU, G.: Beiträge zur stochastischen Modellierung von Wetterdaten und klimatologischen Prozessen. (1980) (Gemeinsam mit TU Berlin, Fachbereich Informatik)

Diplom-Hauptprüfungen

ARNDT, CHR.: Die mittleren stündlichen Temperaturänderungen in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad.

BURGER, A.: Entwicklung und Bau eines mikroprozessorgesteuerten Thermoelementpsychrometers im Hinblick auf die Verwendung auch bei tiefen Temperaturen.

DARKOW, R.: Die interdiurnen Veränderungen der Konvektion über Zentralafrika im Satellitenbild, dargestellt durch Meteosat-Bilder im Zeitraum 1. Sept. – 31. Okt. 1978.

GORETZKI, B.: Der normierte Wärmefluß in der Stratosphäre für den Wirkungsgrad der planetarischen Wellen.

GRETZ, P.: Sensitivitätsanalyse der Ausbreitungsrechnung.

LIFTIN, B.: Ein Beitrag zur Untersuchung des frontalen Low-Level Jet.

MELZER, CHR.: Stadtmeteorologie.

NEUMANN, B.: Klimatologische Untersuchungen zur Temperaturverteilung in Berlin(W) an heiteren Tagen.

SCHOLL, M.: Die Bedeutung ageostrophischer Windkomponenten für die Dynamik und die Kinematik der Atmosphäre, untersucht mit Hilfe des Baroklinen Modells des Deutschen Wetterdienstes.

WOHLFART, R.-C.: Darstellung charakteristischer Kenngrößen der mittleren Stratosphäre im Nordwinter unter besonderer Berücksichtigung des „Final Warnings“.

ZIEHMANN, CHR.: Gletscher im Klimasystem – Grundlagen und einfache Modellansätze.

ZIELINSKI, J.: Vergleich von Feuchtemeßverfahren für die Anwendung in der Meteorologie.

Universität Bonn

Diplom-Hauptprüfungen

BITZER, H.-W.: Ein Grenzschichtmodell zur Behandlung der Strömung über einer Oberfläche mit Rauigkeitsänderung.

CALLIS, U.: Strukturuntersuchungen an den zonal gemittelten Erhaltungsgleichungen mittels eines einfachen stationären Klimamodells.

CARIUS, D.: Regionale Analyse des vertikalen Drehimpulstransportes durch die Untergrenze der Atmosphäre auf der Nordhalbkugel.

EHLI, W.: Verifizierung von unselektiven Strahlungsmessungen an einer Hochlandstation in den äquatorialen Anden mit einer modifizierten Version des Strahlungsmodells STR 10.

HERLITZE, R.: Untersuchungen langer Abflußreihen an Ober- und Mittelrhein.

KOCH, CH.: Einfache analytische Modelle interner Grenzschichten zum Verständnis des Stadteinflusses auf die Atmosphäre.

PELECHATY, J.: Zwei eindimensionale Grenzschichtmodelle zur Berechnung von Energiebilanzen an Eisoberflächen.

RAU, F.-G.: Numerische Experimente zur Hangwindzirkulation.

SEIBEL, M.: Beiträge zur Kenntnis der anthropogenen Einflüsse auf die Verteilung sommerlicher Starkregen im Ruhrgebiet.

WEBER, K.-H.: Abschätzung des Energieaustausches an der Meeresoberfläche im Arabischen und Roten Meer.

WOLFF, T.: Der atmosphärische Massenhaushalt über Europa.

Technische Universität Braunschweig

Promotionen

KLÖCKER, N.: Raketenbeobachtungen von Alfvénwellen großer Amplitude theoretisch erklärt durch Wechselwirkung mit Polarlichtelektronen.

PERTHEN, G.: Messung der Bodenfeuchte und Rauigkeit durch Rückstreuung von Mikrowellen.

Technische Hochschule Darmstadt

Diplom-Hauptprüfungen

BIERBRAUER ZU BRENNSTEIN, H. VON: Berücksichtigung der Winddrehung mit der Höhe in einem vertikal integrierten Modell zur Simulation von Trajektorien in gebirgigem Gelände.

DANN, E.: Statistische Untersuchungen zur Vorhersage der Tagessummen der Globalstrahlung.

FISCHER, B.: Statistische Untersuchungen zur Nebelvorhersage.

FUCHSHUBER, A.: Untersuchungen zur Schadstoffausbreitung mit dem TDMB-Modell.

GLAAB, H.: Zu den Auswirkungen einer Zwangsortogonalisierung der mesoskaligen Modellgleichungen in Orographiekoordinaten.

HAENEL, H.-D.: Vergleich der Modelle zur Schadstoffausbreitung nach TURNER und DOMS.

HERBER, A.: Bestimmung der langwelligen Strahlungsströme an der Erdoberfläche aus synoptischen Wetterbeobachtungen.

HILLER, P.: Ein Verfahren zur Ermittlung des vertikalen spezifischen Feuchtegradienten in den unteren 600 m der Atmosphäre.

MARX, C.: Stationäre barotrope Strömungen in der β -Ebene unter dem Einfluß der Orographie.

MÜLLER, P.: Bearbeitung des Modells von HOULT, FAY und FORNEY zur Simulation einer Schornsteinrauchfahne in indifferenten und stabiler Atmosphärenschichtung und Vergleich mit dem Modell von FAY, ESCUDIER und HOULT in stabilen Schichtungsverhältnissen.

MUTH, H.: Untersuchungen zur Bestimmung einer optimalen Meßnetzdicke für SO_2 -Messungen im Münsterland.

VAN HARTEN, A.: Untersuchung von vier SO_2 -Transportepisoden im Winter 1978/79.

VOGEL, B.: Möglichkeiten der Berücksichtigung von Strahlungseffekten in mesoskaligen Simulationsmodellen – eine vergleichende Untersuchung.

Universität Frankfurt am Main

Promotionen

FRICKE, W.: Die Bildung und Verteilung von anthropogenem Ozon in der unteren Troposphäre.

MEIXNER, F.: Die vertikale Verteilung des atmosphärischen Schwefeldioxids im Tropopausenbereich.

Diplom-Hauptprüfungen

BUSEN, R.: Bestimmung der Erwärmungsrate durch Absorption solarer Strahlung an Aerosolteilchen: Entwicklung und Erprobung eines Meßverfahrens für das Strahlungsangebot.

HÖFKEN, K.-D.: Untersuchung über die Deposition atmosphärischer Spurenstoffe an Buchen- und Fichtenwald.

PFLOCK, H.: Nachweis partikelgebundener polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe in Frankfurt am Main mit Hilfe der Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie.

WAGNER, H.: Entwicklung, Prüfung und Anwendung eines Fünf-Stufen-impaktors.

Universität Freiburg

Diplom-Hauptprüfung

MERKEL, H.: Unregelmäßigkeiten in der Jahresringstruktur junger Kie-

fern (*pinus silvestris* L., *pinus nigra* Arnold) und deren klimatologische Interpretation.

Universität Hamburg

Habilitation

AUGSTEIN, E.: Atmosphärische und ozeanische Grenzschichten in den niederen Breiten.

Promotion

ZANK, I.: Experimentelle Untersuchung der Skalierungseigenschaften turbulenter Druck- und Windgeschwindigkeitsfluktuationen in der wassernahen Luftschicht.

Diplom-Hauptprüfungen

ATHEN, R.: Die Sedimentation von Aerosolteilchen bei verschiedenen relativen Feuchten.

BRETTSCHEIDER, W.: Über die Korrektur der mit Schattenring-solarimetern gemessenen Himmelsstrahlung.

BRUNS, TH.: Statistische Modellierung paläoklimatischer Zeitserien.

CLAUSSEN, M.: Solare Strahlungsübertragung in dreidimensionalen Wolkenfeldern.

CÖLLEN, T.: Einfluß eines Gebirges auf die großräumige Zirkulation einer barotropen Atmosphäre.

FISCHER, I.: Zeitserienanalyse mit der Maximum Entropie Methode.

FLECHSENHAR, K.: Entwicklung einer objektiven Temperaturvorhersage für Hamburg-Fuhlsbüttel aus Daten eines numerischen Modelles.

KAPITZA, H.: Einfluß von Wolken und Regen auf die Bestimmung des Temperaturprofils der atmosphärischen Grenzschicht aus zenitwinkelabhängigen Strahldichtmessungen bei den Frequenzen 54,5 GHz und 58 GHz.

KINNE, ST.: Einfluß von Eiswolken auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre.

KÖNIG, G.: Modellierung von Rauchfahnen zur Bestimmung von Schornsteinüberhöhungen

LEHMHAUS, J.: Charakterisierung des Zeitverhaltens von Zirkulationsmodellen.

SCHLÜNZEN, H.: Zum Problem der Fehlerabschätzung bei Konzentrationsprognosen mit einem numerischen Diffusionsmodell.

STOLLEY, M.: Klassifizierung von atmosphärischen Diffusionsmodellen anhand der Parametrisierung charakteristischer meteorologischer Prozesse.

Universität Hannover

Habilitation

TETZLAFF, G.: Nordafrikanischer Passat im Winter.

Promotionen

KOTTMEIER, CH.: Die Vertikalstruktur nächtlicher Grenzschichtstrahlströme.

KURATA, K.: Theoretische Untersuchungen der Turbulenz innerhalb eines Pflanzenbestandes.

Diplom-Hauptprüfungen

BODIN, M.: Untersuchungen zu andauernden Inversionen.

FRITZSCHE, K.: Der zeitliche Verlauf von Starkwindfeldern im Zusammenhang mit der Verlagerung von Zyklonen in Norddeutschland.

GRÖNING, CH.: Methoden der Verdunstungsberechnung.

MATTHIAS, U. G.: Ein einfaches Modell zur Lösung von Wärmeleitungsproblemen.

RUHE, W.: Ein einfaches Verfahren zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Niederschlag und meteorologischen Parametern am Beispiel des Kochereinzugsgebietes für Tageswerte.

WOLTER, K.: Staubtransporte über Nordafrika und dem angrenzenden Atlantik.

Universität (TH) Karlsruhe

Diplom-Hauptprüfungen

ADRIAN, G.: Simulation der Strahlungsbilanz für die Meßphasen von MESOKLIP.

HAFNER, TH.: Turbulenzstrukturen in der atmosphärischen Grenzschicht abgeleitet aus den Varianzen der Windgeschwindigkeitskomponenten.

MÜLLER, M.: Untersuchungen zum Klima des Stadtkreises Worms.

PILZ, G.: Untersuchung der Luftströmung im Tal des unteren Alpenrheins.

POSS, G.: Messungen von Aerosolverteilungen parallel zu Laser-Doppler-Windgeschwindigkeitsmessungen.

RICHTER, C.: Spektralanalyse immissionsklimatologischer Messungen im Oberrheintal.

ROSE, L.: Über die Verwendung von Heißfilm-Sonden zur Turbulenzmessung vom Flugzeug aus.

WOLLENWEBER, F.: Fehler und Korrekturverfahren von Meßsystemen zur Erfassung turbulenter Strömungen vom Flugzeug aus.

Universität Kiel

Promotion

HESSLER, G.: Untersuchung bodennaher Temperatur- und Windfelder im Übergangsbereich Land-See am Beispiel der Kieler Bucht.

Diplom-Hauptprüfungen

JOSEPH, F.: Untersuchung der Feuchtigkeit im Seegebiet der Kieler Bucht und an einigen sie umgebenden Landstationen.

MYDLA, B.: Longitudinale und zeitliche Veränderlichkeit des durch wandernde und stehende Wellen getätigten meridionalen Transports von relativem Drehimpuls im 200 und 500 mb-Niveau in der Breitenzone von 20° bis 60°N während des Jahres 1975.

RIEGER, K.-W.: Die räumliche und zeitliche Veränderlichkeit des meridionalen Transports sensibler Energie im 850 und 200 mb-Niveau während eines Jahres (1975).

RÖSLER, N.: Bestimmung der Vertikalgeschwindigkeit mit der quasi-geostrophischen Omegagleichung.

SCHOLZ, R.: Die Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Stabilität der Dichteschichtung der wassernahen Luftschicht.

Universität Köln

Promotionen

PREUSS, H.-J.: Analyse von Satellitenbeobachtungen – theoretische Untersuchungen zum Sampling-Problem.

SCHMETZ, J.: Strahlungseigenschaften von Wolkenfeldern.

Diplom-Hauptprüfungen

BUJNOCH, A.: Mehrjährige Sondierungen der planetarischen Grenzschicht inner- und außerhalb von Köln mit einem Schallpulsgeber.

DANIEL, M.: Untersuchungen zur zeitlichen Meßfolge durch Satelliten.

DOHRN, R.: Eine digitale Datenerfassung für einen Schallpulsgeber (SODAR) zur automatischen Inversions- und Konvektionserkennung.

FRENZEN, G.: Veränderlichkeit der meridionalen geostrophischen Transporte von sensibler Wärme und zonalem Impuls durch stationäre Wellen, basierend auf objektiven Analysen des DWD der Jahre 1967 bis 1976.

GERBER, M.: Ein numerisches Modell zur Simulation von Kühlturmschwaden.

KNOTTENBERG, H.: Satellitenbeobachtung arktischer Wolkenfelder.

KÖHNE, A.: Einfluß des lokalen Windes auf den küstennahen Auftrieb vor Portugal und NW-Afrika.

OELLERS, U.: Das Klima von Köln – Literaturdarstellung und Klimastatistik.

PANITZ, H.-J.: Untersuchungen des meteorologischen Einflusses auf das äquatoriale Stromsystem im Atlantik während FGGE.

PONATER, M.: Berechnung von Vertikalgeschwindigkeitsfeldern mit der quasi-stationären Omega-Gleichung aus objektiven Analysen des Deutschen Wetterdienstes.

SIMMER, C.: Untersuchungen des räumlichen Samplings von Satellitendaten mit Hilfe zweidimensionaler Histogramme.

ZEUNER, G.: Das klimatologische Meßnetz der Stadt Köln.

Universität Mainz

Diplom-Hauptprüfungen

BACHERT, R.: Zeitliches und kleinräumiges Verhalten von Tropfen- und Wolken. Aufbau und Eichung der Meßapparatur. Erste Messungen.

SCHWEISSGUTH, N.: Überprüfung von spektralen Transmissionsmodellen der atmosphärischen Infrarotstrahlung.

SORGE, F.: Diffusion von Suspensaten in Wolkenluft.

VOGELGESANG, R.: Methoden zur Berechnung des Bedeckungsgrades infolge Konvektion.

Universität München Meteorologisches Institut

Promotionen

KOSCHNICK, W.: Global-spektrale Untersuchung von Effekten eines isolierten orographischen Hindernisses.

MAKKY, A. M.: Untersuchungen zur Funktion des Schalenkreuzanemometers.

MÜLLER, H.: Die Bestimmbarkeit der atmosphärischen Aerosolgrößenverteilung mit Hilfe eines 4-Wellenlängen-Lidars.

Diplom-Hauptprüfungen

BREHM, M.: Hangwindexperiment Innsbruck 1978 – Gebirgswindsystem und Inversionsauflösung.

KIPFSTUHL, J.: Eigenschaften von Kugelsonden zur Messung des statischen Drucks in der bewegten Atmosphäre.

LEDERER, L.: Die Anwendbarkeit eines mittleren Brechungsindex bei der Berechnung der optischen Eigenschaften eines Aerosolteilchengemisches.

LUKAS, CH.: Hangwindexperiment Innsbruck 1978: Dynamische Struktur der Hangwindsschicht.

OBERHUBER, J. M.: Modellierung eines El Nino-Ereignisses.

Universität München Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie

Diplom-Hauptprüfung

AMTMANN, R.: Die Windböigkeit an der Bestandshöhe eines Fichtenwaldes.

Arbeitskreis „Geschichte der Geophysik“

Anlässlich der 41. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft wurde am 29.3.1982 in Hannover auf Initiative von Prof. Dr. Walter Kertz (Braunschweig) ein Arbeitskreis für „Geschichte der Geophysik“ gegründet. Dieser, der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft angegliederte Arbeitskreis hat das Ziel, das Studium der Geschichte der Geophysik zu fördern, Ergebnisse dieses Studiums bekanntzumachen, und Quellen zur Geschichte der Geophysik (Aufzeichnungen, Instrumente, Datensammlungen) zu sichern. Vorsitzender des Arbeitskreises ist Prof. Kertz, Sekretär Dr. Wilfried Schröder. Dem Gremium gehören zahlreiche Hochschullehrer der Geophysik und andere, an der Geschichte der Geophysik interessierte Wissenschaftler an.

Der Arbeitskreis gibt ein Mitteilungsblatt heraus, das wesentliche Neuerscheinungen, Hinweise zu Forschungsvorhaben, Kurzberichte zu Themen aus der Geschichte der Geophysik, Tagungshinweise, Anfragen der Mitglieder und dgl. enthalten soll. Ab sofort sollen bei den regulären Tagungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft historische Fachsitzungen veranstaltet werden. Für die Zukunft werden auch eigene wissenschaftshistorische Symposien ins Auge gefaßt. Der Arbeitskreis bemüht sich um den Kontakt zu den Wissenschaftshistorikern und Wissenschaftstheoretikern von Nachbardisziplinen.

National und international beobachtet man zur Zeit ein zunehmendes Interesse an der Geschichte der Naturwissenschaften. Verglichen mit anderen Fächern, ist die Geschichte der Geophysik noch unterentwickelt. Dem will der Arbeitskreis abhelfen.

Anschrift:

Sekretär Dr. Wilfried Schröder
Hechelstraße 8
D-2820 Bremen-Rönnebeck

Anschriften der Autoren (Thema dieses Heftes)

Prof. Dr. A. BAUMGARTNER
Dipl.-Met. P. HÖPPE
Dr. H. MAYER
Universität München
Lehrstuhl für Bioklimatologie
und Angewandte Meteorologie
Amalienstraße 52
8000 München 40

Dr. J. v. HOYNINGEN-HUENE
Dr. H. BRADEN
Dipl.-Met. H. FRIESLAND
Dipl.-Met. F. J. LÖPMEIER
Deutscher Wetterdienst
Agrarmeteorologische
Forschungsstelle Braunschweig
Bundesallee 50
3300 Braunschweig

Prof. Dr. K. HÖSCHELE
Universität Karlsruhe
Meteorologisches Institut
Physik-Hochhaus
Kaiserstraße 12
7500 Karlsruhe 1

Dipl.-Met. G. JENDRITZKY
Deutscher Wetterdienst
Zentrale Medizinmeteorologische
Forschungsstelle
Stefan-Meier-Straße 4
7800 Freiburg i. Br.

Dr. R. REITER
Institut für Atmosphärische
Umweltforschung der
Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
Kreuzeckbahnstraße 19
8100 Garmisch-Partenkirchen

Manuskriptsendungen werden erbeten an:

Deutscher Wetterdienst
Hauptschriftleitung „promet“
Frankfurter Straße 135
6050 Offenbach a. M.