

Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

HauptschriftleiterM. Schlegel
Frankfurter Straße 135
6050 Offenbach am Main**Redaktionsausschuß**A. Cappel (Neustadt a.d.W.)
F. Defant (Kiel)
H.-W. Georgii (Frankfurt)
K. H. Hinkelmann (Mainz)
H. Hinzpeter (Hamburg)
E. Lingelbach (Offenbach)
H. Reiser (Offenbach)
H.-P. Schmitz (Berlin)
R. Simonis (Offenbach)
S. Uhlig (Traben-Trarbach)
F. Wippermann (Darmstadt)**Zum Titelbild:**

Das Bild soll deutlich machen, wie sich auch beim meteorologischen Fachbuch das Schwergewicht auf die Behandlung des Klimas und seiner z.T. durch den Menschen beeinflussten Änderungen verlagert hat.

promet erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes – Zentralamt – Frankfurter Straße 135, 6050 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang (4 Hefte) DM 28,-, Einzelheft DM 7,50.

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

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

ISSN 0340 - 4552

8. Jahrgang, Heft 2/3, 1978

Thema dieses Heftes

Anthropogene Klimamodifikation
(Fachliche Redaktion: M. Schlegel)

Beiträge

Seite

- | | | |
|----------|--|----|
| | H. FLOHN | |
| 1 | Die Zukunft unseres Klimas: Fakten und Probleme | 1 |
| | C. JUNGE | |
| 2 | Die CO ₂ -Zunahme und ihre mögliche Klimaauswirkung | 21 |
| | A. BAUMGARTNER; M. KIRCHNER; H. MAYER | |
| 3 | Die Wirkungen von potentiellen anthropogenen Veränderungen der Erdoberflächenbedeckung auf die weltweite Verteilung der Oberflächenalbedo, des Rauigkeitsparameters und anderer wichtiger Parameter des Impulsaustausches an der Grenzfläche der Erde und der Atmosphäre | 32 |

Aus dem Deutschen Wetterdienst

- | | | |
|--|--|----|
| | Wetterfernmeldedienst – für die Zukunft gerüstet (W. BOPP) | 42 |
| | Das Meteorologische Rechenzentrum des Deutschen Wetterdienstes (R. LAMP) | 43 |
| | Das Barokline Modell BKF | 48 |
| | Beschreibung des Modells SMOKA zur Berechnung von Kühlturmmissionen und anderen Auswirkungen (B. RUDOLF) | 48 |

Aus dem Geophysikalischen Beratungsdienst der Bundeswehr

- | | | |
|--|--------------------------------|----|
| | Funk-Prognosen (K.-E. FISCHER) | 51 |
|--|--------------------------------|----|

Aus der Weltorganisation für Meteorologie

- | | | |
|--|---|----|
| | VII. Tagung der WMO-Fachkommission für atmosphärische Wissenschaften (CAS) in Manila, 27. Februar – 10. März 1978 | 54 |
| | XXX. Sitzung des Exekutiv-Ausschusses (EC) in Genf, 20. 5. bis 15. 6. 1978 | 58 |

Das interessante Satellitenbild

- | | | |
|--|---|----|
| | Saharastaubwolke über dem Nordatlantik beobachtet mit METEOSAT-Bildern (M. u. W. KÄSTNER) | 59 |
|--|---|----|

Problem- und Diskussionsecke

- | | | |
|--|---|----|
| | Eine heilige Kuh ist schlachtreif – die Sprache der Meteorologen (D. KARNETZKI) | 63 |
|--|---|----|

Anthropogene Klimamodifikation

Vorbemerkungen

Das Thema "Klima", insbesondere die Frage, wie unsere klimatische Umwelt durch zunehmende menschliche Einwirkungen belastet und verändert wird, beschäftigt seit einigen Jahren nicht nur eine breite Öffentlichkeit, sondern entwickelte sich inzwischen auch zu einem Schwerpunkt wissenschaftlicher Forschung. Dabei geht es im wahrsten Sinne des Wortes um eine "Renaissance der Klimatologie", um ein tieferes, physikalisch begründetes Verständnis des globalen klimatischen Systems und seiner durch innere und äußere Vorgänge bedingten Variabilität sowie um das Problem der Vorhersage zukünftiger Klimaentwicklungen auf der Grundlage geeigneter Klimamodelle. Diese neu sich entfaltende klimatologische Grundlagenforschung hat weltweite Aspekte und Auswirkungen. Aus diesem Grunde hat sich auch die Weltorganisation für Meteorologie dieses Problems angenommen. Wichtige Erkenntnisse und Ergebnisse werden auf der von ihr im Frühjahr 1979 (12.–23. Februar) einberufenen "Welt-Klima-Konferenz" und im Rahmen des "Welt-Klima-Programms" erwartet.

In diesem Doppelheft werden als Ergänzung zu *Promet 4'77 (Klimaschwankungen)* Probleme der anthropogenen Klimamodifikation behandelt. Der 1. Beitrag von H. FLOHN gibt einen Überblick über das Klimaproblem im allgemeinen und über seine zukünftigen Aspekte, während sich der 2. Beitrag (C. JUNGE) mit der besonders wichtigen Frage einer weiteren CO₂-Zunahme und ihrer möglichen Klimaauswirkungen beschäftigt. Einige Überschneidungen sind dabei unvermeidlich. Im 3. Beitrag werden schließlich neuere Untersuchungen von A. BAUMGARTNER u.a. über die Wirkungen von potentiellen anthropogenen Veränderungen der Erdoberfläche auf die globale Verteilung einiger wichtiger Parameter dargestellt.

1 H. FLOHN, Bonn Die Zukunft unseres Klimas: Fakten und Probleme

Inhaltsübersicht

- | | | | |
|-----|---|-----|--|
| 1 | Klima und klimatisches System | 5 | Das Problem der Klimavorhersage: Stand und Aufgaben |
| 2 | Wechselwirkungen im klimatischen System | 5.1 | Modellrechnungen |
| 2.1 | Die Rolle des polaren Treibeises | 5.2 | Zur Frage der Vorhersagbarkeit |
| 2.2 | Das El Niño-Phänomen | 6 | Warmphasen in der Klimageschichte |
| 2.3 | Kontinentale Eisschilde | 6.1 | Frühmittelalterliche Wärmeperiode |
| 3 | Natürliche Ursachen der Klimaschwankungen | 6.2 | Die holozäne Wärmeperiode vor 6000 (bzw. 4000) Jahren |
| 3.1 | Variabilität der Sonnenstrahlung | 6.3 | Letztes Interglazial: Eem-Warmzeit 120 000 v.h. |
| 3.2 | Vulkaneruptionen | 6.4 | Eisfreie Arktis, vereiste Antarktis (12 – 2,5 Mill. v.h.) |
| 4 | Anthropogene Ursachen: die Rolle der Eingriffe des Menschen | 7 | Kaltphasen in der Klimageschichte |
| 4.1 | Energiezufuhr und Luftverschmutzung | 7.1 | Kleine Eiszeit (1550–1850) |
| 4.2 | Kohlendioxid und Spurengase | 7.2 | Übergang zu einer Eiszeit? |
| 4.3 | Die Albedo und das Wüstenproblem | 8 | Wahrscheinlichkeit und Risiken: Die Rolle der Energiepolitik |

1 Klima und klimatisches System

Seit Beginn einer wissenschaftlichen Betrachtung verstehen wir unter *Klima* das zeitliche Integral über das ganze Wechselspiel des Wetters, wie es der Beobachter am festen Ort erlebt: die "Gesamtheit der Witterungen" (HANN 1883), oder "alle Veränderungen in der Atmosphäre, die unsere Organe merklich affizieren" (A. v. HUMBOLDT 1845). Großräumige Advektionsvorgänge führen uns Luftmassen herbei, die noch vor 1 – 2 Tagen über dem warmen Meer der Biskaya, über dem Eismeer bei Grönland/Island oder im Winter über den Schneefeldern Rußlands gelegen haben; sie bringen über die turbulenten Austauschvorgänge physikalische Eigenschaften dieser Unterlagen mit, die die Atmosphäre ständig modifizieren. Diese ortsfesten modifizierenden Einflüsse sind zusammengefaßt in dem Begriff des "klimatischen Systems", in dem sich alle klimagenetischen Vorgänge abspielen (Abb. 1). Es umfaßt

zeit eines Eiskristalles in einer Treibeisscholle zu 1 – 5 Jahren, in einem kontinentalen Eisschild (Grönland, Antarktika) zu $10^4 - 10^6$ Jahren. Die Verweilzeit eines Wasserdampfmoleküls in den oberen Stockwerken des Bodens läßt sich mittels radioaktiver Isotope auf einige Wochen, im Grundwasser je nach Tiefe zu einigen Jahren oder gar (bei Anteilen fossilen Grundwassers) zu einigen 10^4 Jahren schätzen. Die ozeanischen Tiefenschichten, mit Verweilzeiten von 1000 – 2000 Jahren, stehen nur an wenigen Stellen (am Rande der antarktischen Schelfeise, im Raume Island – Grönland) im Austausch mit der oberen Mischungsschicht, während sonst überall ein System von Dichtesprungschichten ("Thermokline") die Durchmischung fast vollständig verhindert. Ein solches *Reglersystem*, dessen wechselseitig gekoppelte Glieder so verschiedene zeitlich-räumliche Dimensionen haben, erzeugt in seinem Ablauf fortwährend Schwankungen: das ist offenbar eine *Hauptursache der Variabilität unseres Klimas*, vor allem der

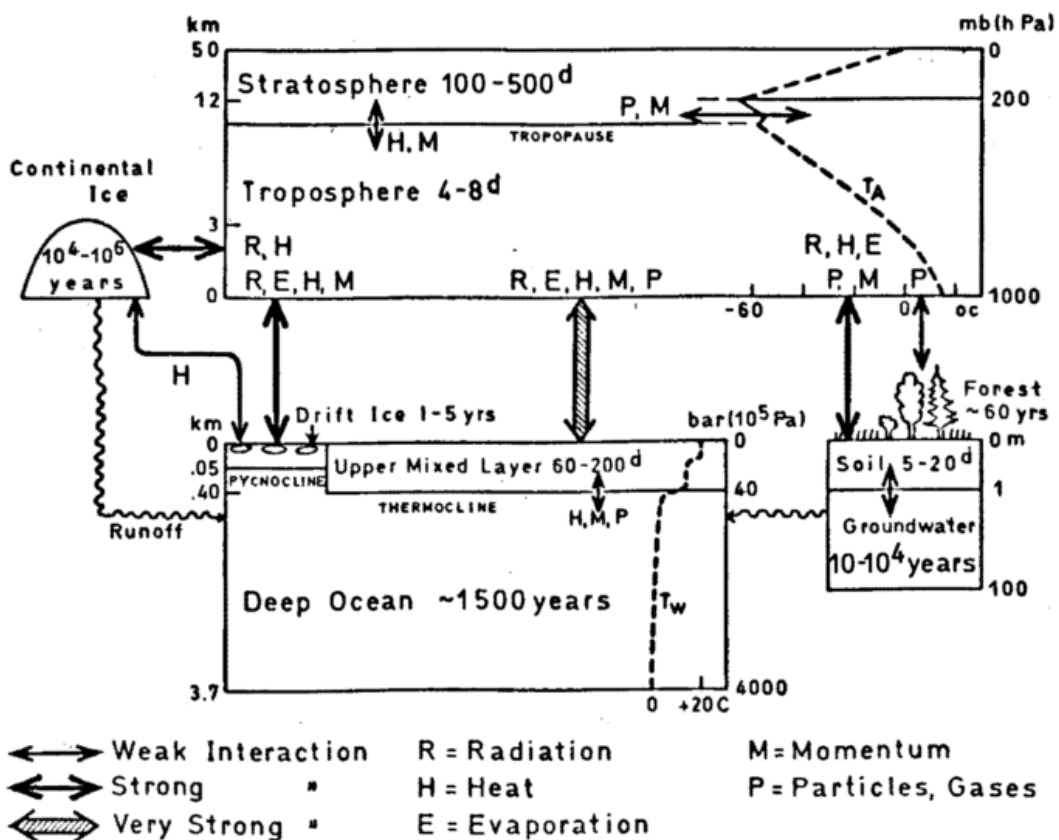


Abb. 1: Das klimatische System mit seinen Wechselwirkungen; charakteristische Zeitskala der Untersysteme

die *Subsysteme Atmosphäre, Ozean, Schnee und Eis*, sowie die obersten *Bodenschichten* und die *Vegetation (Biosphäre)*, die untereinander in Austausch, in Wechselwirkung stehen. Auch diese Zusammenhänge waren intuitiv schon A. v. HUMBOLDT bekannt, der von dem "perpetuierlichen Zusammenwirken" der Meeresfläche und der "wärmestrahrenden Erde, die . . . nackt oder mit Wald . . . bedeckt ist" spricht. Die Subsysteme dieses klimatischen Systems gehorchen verschiedenen Zeitkonstanten, die wir z.T. mittels Autokorrelationskoeffizienten am festen Ort, z.T. mittels der Verweilzeit bestimmter Stoffe abschätzen können: während das "Gedächtnis" der Troposphäre bei 4 – 8 Tagen liegt, das der oberen Mischungsschicht der Ozeane bei ebensoviel Monaten, ergibt sich die Verweil-

"interannuellen" Schwankungen, die eine physikalisch begründete Langfristvorhersage so außerordentlich erschweren (s. Abschnitt 2). Diese kann nur auf einer umfassenden Behandlung des Gesamtsystems aufgebaut werden, sei es auf rein theoretischer Grundlage, auf statistisch-dynamischer oder auf empirischer Basis; die bisher üblichen Methoden verwenden höchstens Ansätze in ganz rudimentärer Form. Leider gibt es in keiner Sprache eine Bezeichnung für den speziellen Witterungsablauf einer Jahreszeit oder eines Jahres – unser Begriff "Witterung", für den es z.B. im Englischen keine Äquivalenz gibt, gilt doch nur für Zeiträume von 3 Tagen bis zu ca. 3 Monaten. Hierin liegt eine Wurzel der oft beklagten Vieldeutigkeit des Begriffs "Klima", der eben diese (häufig gruppenwei-

se auftretenden) "Anomalien" von der Zeitdauer einiger Monate bis wenige Jahre mit umfaßt und nur für Zeiträume von Jahrzehnten anwendbar ist. Ähnliches gilt auch für jede Modellierung des Klimas: da wir das komplexe Verhalten des Ozeans mit seinen zahlreichen Wirbeln (mit einem Durchmesser von 100 – 300 km und einer Lebensdauer von mehreren Monaten) noch keinesfalls genügend genau kennen, sind die bisher vorliegenden Modelle – deren eindrucksvolle Ergebnisse meist auf der Annahme konstanter Ozeantemperatur beruhen und damit jede Wechselwirkung ausschalten – noch nicht in der Lage, das heutige Klima mit seinen jahreszeitlichen Schwankungen in genügend feiner (regionaler) Auflösung zu erfassen (s. Abschn. 5.1).

Ein solches Reglersystem, das mit ganz verschiedenen Übersetzungen (=Zeitkonstanten), mit nicht ausgewuchten Schwungrädern (=quasiperiodische Vorgänge) und mit einer Anzahl höchst wirksamer Rückkopplungen – teils verstärkend, teils dämpfend – arbeitet, erzeugt notwendig einen von Jahr zu Jahr variablen Ablauf. Man kann diesen als statistisches "Rauschen" auffassen – das ist die Betrachtungsweise der klassischen Klimatologie, die die individuellen Vorgänge, die *Witterungsanomalien*, vernachlässigt. Gerade diese Extreme, die sich seit etwa 1960, ähnlich wie im 19. Jahrhundert, wieder häufen, sind aber für Energie- und Wasserversorgung, für Landwirtschaft und Fischerei von ausschlaggebender Bedeutung; sie sind bis heute einer Vorhersage auf empirisch-synoptischer Basis unzugänglich. Darüber hinaus müssen wir auch ganz klar erkennen, daß das heutige Quasi-Gleichgewicht der Prozesse, wie es seit etwa 5000 Jahren besteht, nicht das einzige mögliche ist: die 200 – 300 Jahre instrumenteller Beobachtungen stellen weniger als 1 ppm (Part pro Million!) der gesamten zugänglichen Klimageschichte seit dem Beginn des Paläozoikums vor 550 Millionen Jahren dar. Diese kennt aber ganz andere Gleichgewichtszustände – die 17 – 20 (!) Eiszeiten der letzten 2 Millionen Jahre, kennt

vor allem abrupte Übergänge und Gleichgewichtsstörungen mit einer Zeitskala in der Größenordnung von 100 Jahren. Hier in diesem "fast intransitiven" Verhalten (LORENZ) liegt das eigentliche Problem der Klimatologie, das nur einer interdisziplinären Betrachtung unter voller Berücksichtigung der allzulang vernachlässigten historischen Aspekte zugänglich ist. Hier müssen die Ergebnisse der vielen beteiligten Wissenschaften (z.B. Ozeanographie, Glaziologie, Ökologie, Geologie und Geophysik der festen Erde, aber auch einiger historischer Disziplinen) berücksichtigt werden – jede Beschränkung auf die Physik der Atmosphäre (so wichtig sie ist!) führt notwendig zu partieller Kurzsichtigkeit.

An dieser Stelle sollte ein Wort über die heute wieder vielfach übliche Suche nach Perioden gesagt werden (Abb. 2). Diese nach Einführung des Computers wieder neu aufgelebte Suche ist offensichtlich zum Scheitern verurteilt. Denn in dem uns interessierenden Bereich von 1 – 100 Jahren gibt es keine wirklich durchlaufenden Perioden mit genügend hohem Anteil an der gesamten Varianz (Abb. 2); auch die vielfach für kürzere oder längere Zeit in regional begrenzten Abschnitten nachgewiesenen Perioden (bevorzugte Längen ca. 26 Monate, 5, 11 und 22–23 Jahre) enthalten entweder einen zu kleinen Anteil an der Varianz, oder ihre Amplitude und Phase unterliegt unerklärlichen Änderungen und Sprüngen. Erfahrene Prognostiker kennen eine Art von Gesetz: jede gerade aufgefundene Periode neigt dazu, im Augenblick ihrer Entdeckung wieder zu verschwinden . . . Der zweifellos wichtige Nachweis der Perioden der Erdbahnelemente in Tiefseesedimenten (HAYS, IMBRIE, SHACKLETON 1976) ist wegen der Zeitskala 20 – 100 000 Jahre für unsere Betrachtung ohne Belang. Klimatologie ist heute längst keine beschreibende Wissenschaft mehr: sie ist eine Aufgabe, die um so wichtiger wird, je stärker wir selbst in die Randbedingungen dieses sensitiven klimatischen Systems (Boden und Vegetation, Zusammensetzung der Atmosphäre) eingreifen.

Tentative Spectrum of Climatic Variations

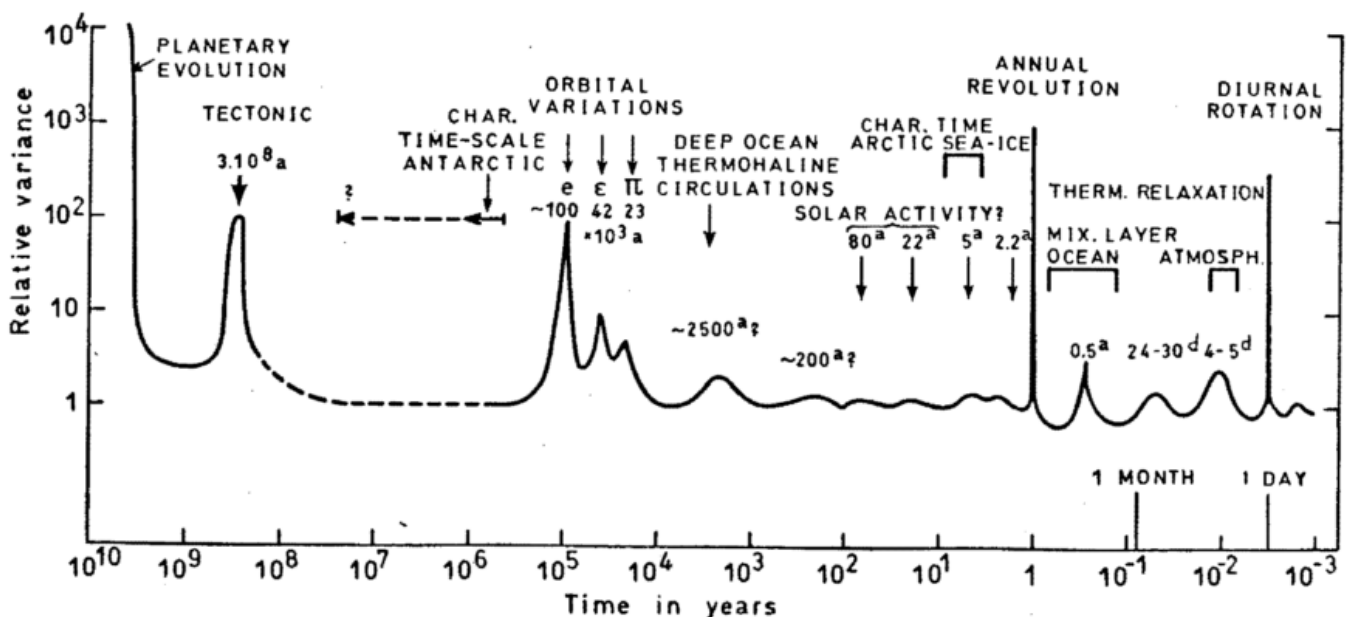


Abb. 2: Spektrum der Klimaschwankungen (10^{-3} bis 10^{10} Jahre; relative Einheiten)

2 Wechselwirkungen im klimatischen System

Über die Ursachen der eben erwähnten Witterungs- oder Klimaanomalien – darunter verstehen wir statistisch definierte extreme Abweichungen vom Normalwert, mit einer Andauer zwischen einem Monat und wenigen Jahren – sind in den letzten 20 Jahren wesentliche Beiträge geliefert worden (NAMIAS und J. BJERKNES, RODEWALD, J. FLETCHER und Mitarbeiter), die die Wechselwirkungen zwischen der kurzlebigen Troposphäre und den langlebigen Gliedern des klimatischen Systems, besonders Ozeane (obere Mischungsschicht) und Treibeis, in den Vordergrund gerückt haben. Damit ergeben sich auch Aussichten für eine geophysikalisch begründete Langfristvorhersage, die endlich über die bisher üblichen, z.T. allzu einfachen, engräumigen Überlegungen hinausgehen. Für Zeiträume von 1 – 6 Monaten erscheint eine brauchbare Lösung auf halb-empirischer bzw. statistisch-dynamischer Basis durchaus möglich, wenn auch hier sicher noch eine Menge Entwicklungsarbeit auf globaler Basis geleistet werden muß.

Von diesen Wechselwirkungen sollen hier nur die beiden wichtigsten behandelt werden: die Rolle des arktischen Treibeises, sowie die des äquatorialen Aufquellens von kaltem Tiefenwasser. Im Anhang daran soll noch auf die seltene, aber doch mögliche Rolle des kontinentalen Antarktisch-Eisschildes hingewiesen werden.

2.1 Die Rolle des polaren Treibeises

Die Rolle des *arktischen Treibeises* für die Gestaltung unseres Klimas kann kaum überschätzt werden; es bildet sich in einer nur wenige Dekameter mächtigen, salzarmen und daher weniger dichten Deckschicht des mehrschichtigen arktischen Ozeans (Abb. 3). Es handelt sich um einen typischen Wechselwirkungsvorgang innerhalb des klimatischen Systems: Abkühlung verstärkt das Treibeis, das sich

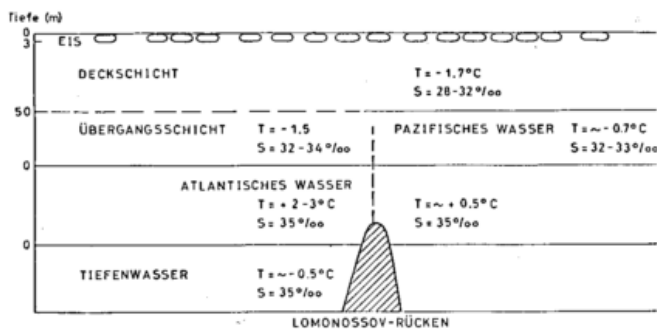


Abb. 3: Vertikalschichtung und Wassermassen (schematisiert) im Arktischen Ozean (T = Temperatur, S = Salzgehalt)

– den variablen Windströmungen folgend – ausbreitet und seinerseits wieder zu weiterer Abkühlung führt. Dabei ist der entscheidende Faktor das Reflexvermögen (Albedo): beträgt die Albedo offenen Wassers bei niedrigem Sonnenstand etwa 8–12%, so liegt diejenige einer schneebedeckten Eisscholle bei 80%, selbst während der Schmelzperiode (mit oberflächlichen Schmelzwasserpützen) immer noch bei 60%. Allerdings nimmt in dieser Jahreszeit der Anteil der offenen Stellen (Waken, russischer Fachausdruck: Polynyas) von 2–3% auf 15–20% zu. Die repräsentativen

Wärme- und Strahlungsströme an der Oberfläche sind wegen dieser horizontalen Inhomogenität sehr schwer abzuschätzen, besonders im Winter, wo der Gegensatz zwischen einer Lufttemperatur von -30°C bis -35°C und der Gefriertemperatur von Meereswasser ($-1,9^{\circ}\text{C}$) am stärksten ist und den Massenhaushalt der dünnen Eisschollen (im Mittel etwa 3 m, im Einzelfall, je nach Alter, 50 cm bis 6 m) empfindlich beeinflusst (VOWINCKEL und ORVIG). In einer offenen Wake finden wir enorme Ströme fühlbarer und latenter Wärme (Verdunstung), die das mehrfache der Solarkonstante erreichen können. Selbst im Hochsommer kann es vorkommen, wie der Verfasser Ende Juli 1972 beobachtet hat, daß mehrere Kilometer breite Wasserflächen infolge dieses ständigen Wärmeverlustes an die advective herangeführte kältere Luft überfrieren. In einem Modell, das zur Vereinfachung eine horizontal homogene Eisdicke annimmt (MAYKUT und UNTERSTEINER), führen zwei besonders sensitive Vorgänge zu einer Abnahme der Eisdicke: eine verringerte Albedo der Eisoberfläche (z.B. durch Verschmutzung, auch durch Öl) und eine Zunahme der Wassertemperatur. Dieser Effekt würde noch erhöht werden durch eine Zunahme des Salzgehaltes, als Folge der Ableitung der Süßwasserzufuhr der großen Flüsse Sibiriens und Kanadas zu Bewässerungszwecken: dies führt notwendig zu einer Dichteabnahme, damit zu geringerer Stabilität der ozeanischen Schichtung, zu stärkerem Vertikalaustausch und ebenfalls zu einer Abnahme der Eisproduktion.

Kommt es (s. Abschn. 3.2) während eines oder mehrerer Sommer zur Ausbildung einer stratosphärischen Staubwolke, dann sinkt die direkte Sonnenstrahlung, aber auch die Globalstrahlung (wegen der erhöhten Rückwärtsstreuung) ab, die Schmelzperiode (Mitte Juni – Ende August) verkürzt sich, im Sommer schmilzt weniger Eis oben ab und in der übrigen Zeit gefriert unten etwas mehr an: das ist ein (wegen der Dicke des Eises gedämpfter) Rückkopplungseffekt. Bleibt im Küstengebiet und im kanadischen Archipel der Schnee länger liegen, erhalten sich mehr Schneereste über den Sommer hin (wie 1972), dann ist die advective Temperatur in der Luft niedriger, mit dem gleichen Effekt; im Winter lösen tiefere advective Temperaturen – etwa durch frühzeitiges Einschneien, wie im September/Oktober 1971 eine verstärkte Bildung von Neueis ein. Nach verschiedenen Modelluntersuchungen nimmt die Eisdicke im Winter unter sonst gleichen Bedingungen umgekehrt proportional zur Eisdicke zu: dünnes einjähriges Eis (50–100 cm mächtig) wächst rascher als mehrjähriges, und mit 5–6 m ist je nach Schneedecke die maximale Dicke etwa erreicht. Nach den Ergebnissen der U-Boot-Fahrten ist die Angabe einer mittleren Eisdicke sinnlos – diese variiert je nach Alter statistisch zwischen 0,5 und 6 m; auch die Satellitenaufnahmen der thermischen Mikrowellenstrahlung zeigen ein ganz unregelmäßiges Mosaik als Funktion der Eisdicke.

In dieser *Sensitivität* des Massenhaushalts der dünnen, vielfach durchbrochenen *arktischen Treibeisdecke* liegt offensichtlich eines der Schlüsselprobleme der Klimaentwicklung. Etwa 70% der Eisdecke besteht aus mehrjährigem Eis, bei dem jeweils etwa 50 cm in der kurzen sommerlichen Schmelzperiode oben abschmilzt, in der übrigen Zeit unten anfriert – auf diese Weise wandert jeder Eiskristall von unten nach oben in 5–10 Jahren durch die Scholle hindurch. Wird nun z.B. das sommerliche Abschmelzen um

10% erhöht, dann nimmt die Dicke des Eises (nicht-linear) ab und der Anteil der offenen Stellen zu, was wiederum eine Änderung der Wärmebilanz zur Folge hat. Zweifellos brauchen wir realistische Modelle dieses komplizierten, horizontal homogenen Vierphasensystems (Ozean – Eis – Schneedecke – Luft), die auch die vom Wind angetriebene Dynamik (vier-dimensional) berücksichtigen, um abschätzen zu können, unter welchen Bedingungen diese dünne Treibeisdecke sich verstärkt, abschwächt oder gar (was zuerst BUDYKO ab 1962 ernsthaft untersucht hat) verschwindet.

In diesem Zusammenhang sei nur erwähnt, daß dieses Treibeis im Schwimmgleichgewicht ist, sein Verschwinden sich also auf den Meeresspiegel ebenso wenig auswirken kann, wie das Schmelzen eines Eiswürfels im Whisky-Glas.

Während die Fläche des arktischen Treibeises z.Z. im Frühjahr etwa 11,8, im Spätsommer etwa 8,2 Mill. km² beträgt, beläuft sich die des *antarktischen Treibeises* im Frühjahr auf rund 22, im Spätsommer nur auf 3,6 Mill. km²; hier handelt es sich also ganz überwiegend um einjähriges, jahreszeitlich-advektiv neugebildetes Eis mit einer mittleren Dicke von 120–150 cm. Dieser markante Gegensatz ist die Folge der um den Pol konzentrierten Lage des antarktischen Kontinents (während Grönland sich zwischen 59° und 82°N erstreckt), die so viel tiefere Temperaturen (im Mittel der Troposphäre 11–12°C) zur Folge hat, als über der Arktis mit ihrer dünnen Treibeisdecke.

Wärmehaushalt und Dicke des arktischen Treibeises wirken sich wiederum unmittelbar aus in der Ausdehnung und Intensität des sommerlichen Kältezentrums über dem inneren Polargebiet. Das mag eine der Ursachen sein für den unerwarteten Vorstoß arktischen Treibeises in den Jahren nach 1963, mit dem Maximum in der Eisperiode 1965–72 im Raume Island (Abb. 4), während der erstmals seit vielen Jahrzehnten wieder die Nordküste Islands im Frühjahr monatelang vom Eis blockiert war. Noch wichtiger war der Vorstoß arktischen Treibeises, verbunden mit der Höchstzahl von Eisbergen aus Westgrönland (RODEWALD, STRÜBING) in den Raum Neufundland-Labradorsee, mit dem Maximum 1971–73: die hier eingeleitete Abkühlung des westlichen Nordatlantiks hat die atmosphärische Zirkulation umgeschaltet, mit einer resultierenden Strömung warmen Wassers und warmer Luft an den Küsten Europas, die wiederum mit beteiligt war an der Vorherrschaft milder Winter und an der Entstehung der ungewöhnlich häufigen und schweren Sturmzyklonen der Jahre 1972–76 über den Britischen Inseln und der Nordsee. Diese "nordatlantische Wärmeschaukel" war schon Ende vorigen Jahrhunderts wohlbekannt.

2.2 Das El-Niño-Phänomen (Konvergenzen und Divergenzen der ozeanischen Ekman-Drift am Äquator)

Eines der interessantesten Phänomene, das erst spät als Folge der Wechselwirkung an der Grenzfläche Ozean – Atmosphäre erkannt wurde, läuft in der Literatur unter dem Begriff El Niño = das Kind (spanisch), d.h. das Christ-

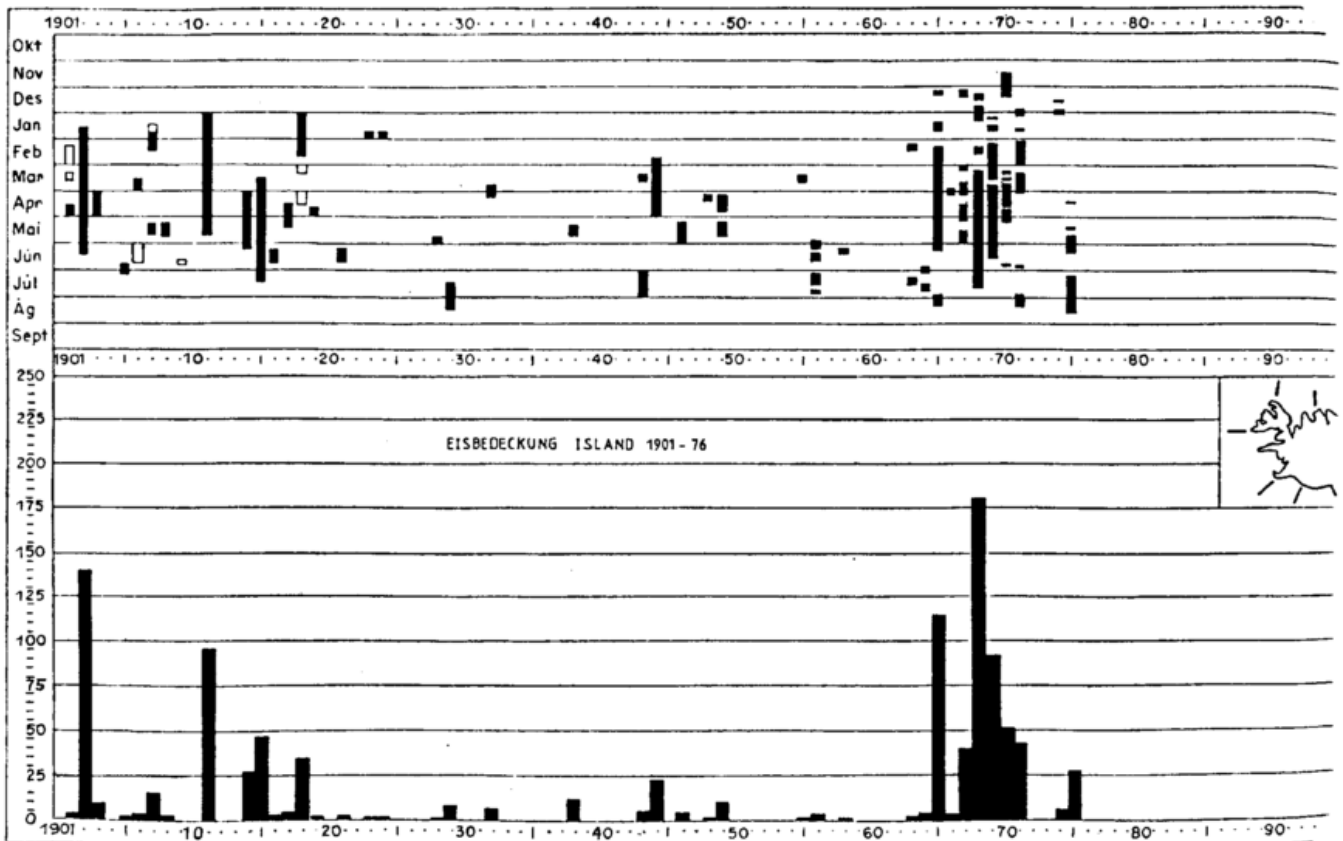


Abb. 4: Treibeis an Islands Küsten 1901 – 1976 (nach SIGTRYGSSON). Oben Andauer, unten Eis-Index in Wochen x Zahl der betroffenen (9) Sektoren.

kind, weil es an der Küste Perus meist um Weihnachten beginnt; es kann dann mehrere Monate bis zu einem Jahr hin anhalten. Zunächst handelt es sich nur um das vorübergehende Ausfallen der küstennahen *Aufquellphänomene*, das wie auch an den Küsten Kaliforniens und Nordwestafrikas regelmäßig im Sommer auftritt, ähnlich an der Somalikküste und im Südosten Arabiens. Auf der Südhalbkugel reicht in Südamerika und Südwestafrika das Küsten-Aufquellen vom Wendekreis bis annähernd zum Äquator, hier aber im Südsommer mit mehr oder minder häufigen Störungen, die vom Äquator ausgehen und in manchen Jahren nur bis $5-7^\circ$ Südbreite reichen, in extremen Jahren aber bis $15-18^\circ$ Breite. Dabei verschwindet das kalte, nährstoffreiche Küstenwasser mit seinem Fischreichtum, überdeckt von warmem, fischarmem Wasser äquatorialer Herkunft: dieses El-Niño-Phänomen hat 1972 den Fischfang Perus – der führenden Nation auf diesem Gebiet – auf 10% reduziert, und tritt in ähnlicher Form auch gelegentlich an den Küsten von Angola-Zaire-Gabun auf. In der Atmosphäre führt das anstelle der vom Kaltwasser erzeugten Stabilität der Schichtung zu instabiler Tropikluft, die in der Küstenwüste schwere Schauer und Hochwasser hervorruft, wobei die Temperaturen von $20-22^\circ\text{C}$ auf 26°C ansteigen.

Die Ursache liegt in ganz großräumigen Vorgängen – nicht in der Antarktis, wie fälschlich angenommen. Vielmehr tritt das gleiche Phänomen auch in einem Streifen längs des Äquators auf, geringfügig nach S verschoben: hier liegt normalerweise eine Zunge kalten Aufquellwassers, die sich von der Ecuadorküste her über die Galapagos (mit ihren Pinguinen) über den größten Teil des Pazifiks bis über die Datumsgrenze (180°W) hinaus, mehr als 12000 km bis nach der Phosphatinsel Nauru erstreckt. Das ist die "trockene Äquatorzone" der klassischen Klimatologie (SCHOTT 1938): normalerweise führt hier äquatoriales Aufquellen zu Stabilität und Aridität, umso mehr, je stärker die tropischen Ostwinde beiderseits des Äquators wehen, je stärker also die tropischen Hadley-Zellen der Atmosphäre ausgeprägt sind. Als Folge der Reibungskräfte entsteht beiderseits des Äquators im Ozean eine Oberflächenströmung, die auf jeder Halbkugel polwärts gerichtet ist und divergiert, sodaß das kühle Tiefenwasser aufquellen muß. Abbildung 5 zeigt hier in diesem Gebiet den Normalfall, bei dem schon südlich des Äquators die (im Mittel über die ganze Reibungs-Schicht um 90° abweichende) *Ekman-Drift* eine *Divergenz* hervorruft; Hauptursache ist der Vorzeichenwechsel der Coriolisbeschleunigung am Äquator. Schwächt sich nun diese tropische Ostströmung ab, so entstehen – das haben neuere Modelle gezeigt – Kelvinwellen, die zu einer Umkehr der Ekman-Drift und zur Konvergenz des warmen Oberflächenwassers am Äquator führen. Auch hier kommt es bei normalen tropischen Wassertemperaturen ($26-27^\circ\text{C}$) jetzt zu kräftigen, häufigen Regenfällen, nicht selten zu ausgedehnten Cumulonimbusherden mit mehreren 100 km Durchmesser ("mesoscalar clusters"): in Nauru ist der typische Monatsniederschlag bei dieser Situation 300 – 800 mm, bei aufquellendem Kaltwasser dagegen 10–15 mm, in den Galapagos (ca. 90°W) ist der Unterschied noch stärker. DOBERITZ hat gezeigt, wie diese Anomalien gleichzeitig über der ganzen Äquatorzone des Pazifiks auftreten, weitere Arbeiten haben ihre Ausdehnung längs der Westküste Amerikas zugleich nach Peru und Südkalifornien hin nachgewiesen.

Equatorial Flow Patterns and Upwelling

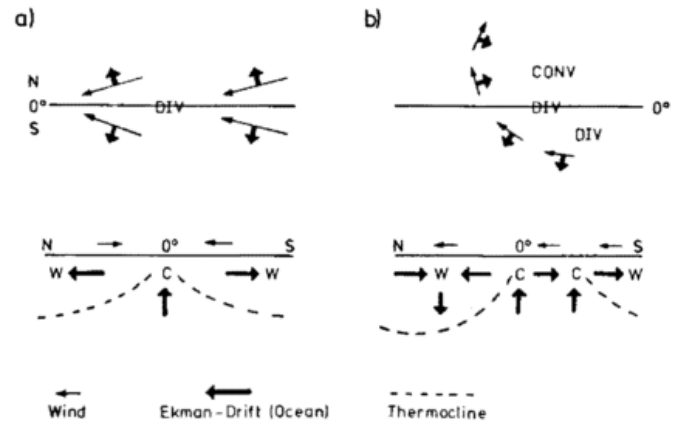


Abb. 5: Divergenz der ozeanischen Ekman-Drift am Äquator (a = symmetrischer Fall, b = asymmetrischer Fall) nach J. BJERKNES und FLOHN

Untersuchungen von J. BJERKNES und Modellrechnungen von ROWNTREE haben die großräumige Auswirkung dieser Anomalien nachgewiesen; die Ursache liegt in den enormen Schwankungen des Wärmehaushalts über Flächen von 6×110 Meridiangrad $\sim 8,1$ Mill. km^2 . Neuere Detail-Untersuchungen (TREMPEL) zeigten einen Rückgang der Verdunstung in der Aufquellzone südlich der Galapagos auf 30 cm/a (!) gegenüber rund 120 cm/a auf beiden Flanken; der Strom fühlbarer Wärme kehrt sich (wie beim Oaseneffekt auf Land!) um und führt (geringe) Energiebeiträge dem Meer zu, das den größeren Teil der im wolkenfreien Raum ungehinderten Einstrahlung zur Erwärmung des mit ca 50 cm/d aufquellenden Tiefenwassers benötigt. Die Umkehr dieses Mechanismus bedeutet allein bei der Verdunstung der tropischen Ozeane eine Änderung um 5%, für alle Ozeane allerdings nur 2%; ein regionaler Effekt erscheint ziemlich wahrscheinlich. Neueste Untersuchungen (NEWELL) machen es wahrscheinlich, daß auch die Aufnahme von CO_2 durch den Ozean durch den plötzlichen Übergang von nährstoffreichem CO_2 -gesättigten Tiefenwasser zu nährstoffarmem Warmwasser sich flächenhaft um einige Prozent ändert – das mag eine der Ursachen für die Variabilität der atmosphärischen Zunahme des CO_2 -Gehalts sein (Abschn. 4.2).

2.3 Kontinentale Eisschilde

Während die Fläche des arktischen Treibeises (s. Abschn. 2.1) zwischen etwa 8 und 12 Mill. km^2 schwankt, besteht das antarktische Treibeis zu über 80% aus jahreszeitlichem Treibeis. Beide Treibeisgebiete nehmen im Jahresmittel mit rund 23 Mill. km^2 nahezu 5% der Erdoberfläche ein; Dicke und Volumen sind aber minimal gegenüber den kontinentalen Eisdomen von Grönland und Antarktika, mit einer Fläche von knapp 2 bzw. 13 Mill. km^2 und einer mittleren Eisdicke von 1200 bzw. 2200 m. Während das grönländische Inlandeis in einer großen Gebirgsschüssel liegt, und seinen Massenüberschuß in vielen Gletschern in Form zahlreicher einzelner Eisberge abgibt, ruht das antarktische Eis überwiegend auf einem festen Felssockel oberhalb des Meeresspiegels; sein Abfluß geschieht über riesige Schelfeise in Form ausgedehnter Tafelberge. Jedoch liegt ein Teil – die sogenannte Westantarktis, die sich von der antarktischen Halbinsel südlich Südamerika

zum Pazifik erstreckt – überwiegend auf einem Felssockel unter dem Meeresspiegel. Neuere Untersuchungen (HUGHES) haben ergeben, daß dieser Sektor schon mehrfach "aufgeschwommen" und dann abgeschmolzen ist, mit einem weltweiten Anstieg des Meeresspiegels um 5–7 m: das sind die in Fachkreisen neuerdings viel erörterten antarktischen Ausbrüche (surges), die – in Analogie zu den in Alaska und in anderen Gebieten beobachteten rapiden Gletschervorstößen – rasch ablaufen können. Ein mathematisches Modell dieser Ausbrüche hat BUDD (Melbourne) entwickelt; offenbar handelt es sich jedoch um sehr seltene Ereignisse (zuletzt vor ca. 115 000 Jahren, im letzten Interglazial), über deren Zeitskala und Ablauf noch sehr wenig bekannt ist.

Die mögliche Bedeutung eines solchen Ereignisses liegt in dem *Ansteigen des Meeresspiegels*: eine detaillierte Untersuchung (auch in dem bisher fast unzugänglichen Bereich des Weddellmeeres) ist dringend erwünscht, auch wenn das derzeitige Eisprofil im untersuchten Gebiet des Roß-Schelfs noch nicht den Gleichgewichtsstand erreicht hat. Kleinere Vorgänge dieser Art (wobei Eismassen von maximal $1-2 \cdot 10^5 \text{ km}^3$ beteiligt sein mögen, statt $> 10^6 \text{ km}^3$) sind wahrscheinlich auch in der Nacheiszeit aufgetreten; beim Kalben der Schelfeise entstehen riesige Tafelberge bis zur Größe Hollands oder Belgiens. In Grönland sind alle diese Vorgänge von viel geringererem Ausmaß.

3 Natürliche Ursachen der Klimaschwankungen

3.1 Variabilität der Sonnenstrahlung

Abgesehen von solchen im "internen" klimatischen Reglersystem begründeten kurzfristigen Schwankungen, werden immer wieder äußere (externe) Faktoren als Ursache von klimatischen Schwankungen bezeichnet. Zuerst müssen wir die Frage aufwerfen: ist unsere primäre Energiequelle, die Sonnenstrahlung wirklich konstant, oder führt der Begriff der "Solarkonstanten" in die Irre? Diese Frage ist z.Z. leider noch völlig offen; wir verfügen über keine einwandfreien Messungen zu ihrer Entscheidung (MASON). Messungen von hochfliegenden Ballonen in 23 – 30 km Höhe, die KONDRATIEV während 6 Jahren in der Sowjetunion durchführte, können auch in dieser Höhe noch von stratosphärischem Staub vulkanischer Herkunft beeinflusst worden sein; indirekte Belege, wie sie durch Beobachtung der Albedo anderer Planeten (so Uranus) gewonnen werden können, sind etwas unsicher. An der Ausrüstung von Satelliten mit hochempfindlichen, vom Boden her kontrollierbaren Meßfühlern (mit einer über Jahre festzuhaltenden Meßgenauigkeit von 1 Promille) wird intensiv gearbeitet. Neue Daten über das nahezu völlige Fehlen von Sonnenflecken in der Zeitspanne 1645 – 1710 und über Schwankungen der Rotationsdauer der Sonne in dieser Zeit (EDDY) scheinen doch – entgegen dem Votum der Mehrzahl der Astronomen – für eine höhere Variabilität der Sonne zu sprechen. Daß eine Änderung von nur 1–2 Prozent bereits erhebliche Auswirkungen auf das Klima haben kann, ergibt sich aus Rechnungen mit einfachen (BUDYKO) oder fortgeschrittenen Klimamodellen, die jedenfalls die Dynamik der Atmosphäre und den Wasserkreislauf in Rechnung stellen (WETHERALD und MANABE).

Die Rolle der solaren Aktivität ist inzwischen wieder aktuell geworden, aber sicher handelt es sich nicht um einfache zyklische Vorgänge, wenn auch für eine etwa 23jährige Periode mehr Belegmaterial existiert als für die klassische 11-Jahresperiode. Aber der Anteil an der gesamten Varianz ist im allgemeinen gering, und unerklärliche Phasensprünge (MASON) unterstützen nur die weitverbreitete Skepsis gegenüber der Nützlichkeit für praktische Zwecke. Auch sorgfältige empirische Studien (OLIVER, MASS und SCHNEIDER) konnten keinen Beweis für ihre Rolle im Klimageschehen liefern (s. a. Abschn. 1).

3.2 Vulkaneruptionen

Sicher belegt ist dagegen durch neue statistische Untersuchungen (YAMAMOTO, MASS und SCHNEIDER) und Modelle (HUNT, POLLOCK) die globale Wirkung von großen Vulkanausbrüchen, deren Exhalationen in die Stratosphäre gelangen und in Höhen zwischen 20 und 50 km Partikel bilden, die die ständig vorhandene "JUNGSCHICHT" um einen Faktor 10 – 100 verstärken und farbenprächtige Dämmerungserscheinungen hervorrufen. Diese stratosphärischen Staubwolken (zuletzt nach Ausbrüchen des Agung auf Bali 1963 und des Fuego in Guatemala 1974 auch in Mitteleuropa sichtbar) absorbieren einen Teil der Sonnenstrahlung und streuen einen anderen Teil zurück in den Weltraum: hierdurch kommt es im Mittel über die ganze Erde zu einer Abkühlung um bis $1-1,5^\circ\text{C}$, die allerdings selten mehr als 1–2 Jahre hindurch anhält. Sie überlagert sich den wesentlich stärkeren Temperaturänderungen, die ständig advektiv, durch den Transport von Warmluft oder Kaltluft entstehen und über Monate hinweg ziemlich ortsfest sein können: derartigen Transportvorgängen verdanken wir in Westeuropa jetzt eine sehr auffällige Folge von 7–8 zu milden Wintern, im Gegensatz zu extrem kalten Winterabschnitten in Nordamerika (Januar 1977, z.T. der kälteste dieses Jahrhunderts) oder Osteuropa.

Die Häufigkeit großer Vulkanausbrüche, die vor allem LAMB für die Zeit seit 1500 untersucht hat, schwankt sehr stark: während in einzelnen Zeitabschnitten (so um 1690 oder 1815–1835) viele große Ausbrüche in den verschiedensten Gegenden der Erde sich häufen, gibt es auch längere Zeiträume (so 1912–1948), in denen sie ganz fehlen oder doch nur vereinzelt auftreten. Seit etwa 1955 leben wir in einem Abschnitt wiederauflebender, aber nur mäßiger Vulkantätigkeit. Aber die auffällige Häufung sehr schwerer Erdbeben in den letzten Jahren läßt erkennen, daß auch mit schweren Vulkanausbrüchen jederzeit gerechnet werden muß. Denn diese beiden Ereignisse sind, wie wir heute sicher wissen, kollektiv miteinander gekoppelt: es sind die langsamen *Driftbewegungen der großen tektonischen Platten*, die einerseits im Bereich der großen, meist ozeanischen Riß-Zonen Vulkanausbrüche auslösen, andererseits unter die großen Kontinentalschollen untertauchen und dabei schwere Erdbeben mit tiefsitzendem Herd auslösen. Ein direkt sichtbarer Teil des großen atlantischen Spaltensystems zieht quer durch Island; in diesem Bereich traten in den letzten Jahren mehrfach Vulkanausbrüche (Surtsey, Heimaey, Kraftla) auf. Im Bereich des letzteren kam es am Myvatn-See in N-Island im April 1977 zu einem Aufreißen von zwei parallelen Spalten mit einer Zerrung des Geländes von 2 m auf 1 km mit anhaltenden Dampfexhalationen, die ein fast vollendetes geothermisches Kraftwerk außer Funktion setzten.

Das episodische, diskontinuierliche Auftreten vulkanischer Ereignisse gilt nicht nur für die (hier unmittelbar interessierende) Zeitskala $10^1 - 10^2$ Jahre, sondern auch in der Zeitskala $10^3 - 10^4$ Jahre, ja sogar – wie aus den Ergebnissen des Deep Sea Drilling Programms hervorgeht, im Bereich $10^6 - 10^7$ Jahre.

Die *Klimageschichte* lehrt uns, wie große Vulkanausbrüche globale Abkühlungen für 1–3 Jahre auslösen, die natürlich in einigen Gebieten durch advective Erwärmung überlagert werden können. Der stärkste, noch gut belegte Fall dieser Art ereignete sich nach dem größten historischen Ausbruch des Tambora auf Sumbawa im Frühjahr 1815: die Sommer 1816 und 1817 waren in Europa, Japan und Nordamerika ungewöhnlich kühl z.T. feucht, und von schweren Mißernten begleitet, die im Rheinland (mit seinen durch Erbteilung zersplitterten Bauernhöfen) eine erste Welle von Auswanderungen nach Amerika einleiteten. Die Getreidepreise Mitteleuropas erreichten ihr absolutes Maximum vor 1950 (Abb. 6), und in den Vereinigten Staaten war 1816 das "Jahr ohne Sommer".

4 Anthropogene Ursachen: die Rolle der Eingriffe des Menschen

4.1 Energiezufuhr und Luftverschmutzung

Gegenüber der überragenden Rolle der Sonnenstrahlung – die an der Obergrenze der Erdatmosphäre rund 340 Watt auf jeden m^2 der rotierenden Erde abgibt – und ihren Umsetzungen innerhalb der Atmosphäre, die als Strahlungsbilanz oder "Nettostrahlung" an der Erdoberfläche im Mittel noch rund $100 W/m^2$ liefern, ist der Anteil der direkten Energiezufuhr als primärer Beitrag des Menschen mit $0,015 W/m^2$ verschwindend gering, höchstens vergleichbar mit dem geothermischen Wärmestrom aus dem Erdinneren ($0,06 W/m^2$) oder dem Anteil der photosynthetischen Prozesse in der Biosphäre ($0,2 W/m^2$). Diese globalen

Mittelwerte geben jedoch ein völlig falsches Bild: tatsächlich ist der Energieverbrauch in den großen Industriezentren konzentriert und erreicht dort lokal $10-50 W/m^2$ über Flächen von der Größenordnung $100 - 1000 km^2$. Diese Energiezufuhr erzeugt die Wärmeinseln der großen Städte, mit einer zusätzlichen thermischen Zirkulation und einer statistisch gesicherten Häufung konvektiver Starkregen.

Auf der anderen Seite ist der Wirkungsgrad der Sonnenenergie in der Erdatmosphäre mit 0,7% sehr gering, d.h. der Energieumsatz im klimatischen System, die Erzeugung verfügbarer potentieller Energie und die Vernichtung kinetischer Energie liegt auch nur bei $2,4 W/m^2$. Da Energie ja nicht verbraucht, sondern nur umgewandelt werden kann, dringen diese vergleichenden Überlegungen nicht in die Tiefe des Problems, das hier nur angedeutet werden kann: hierzu benötigen wir Grundbegriffe der heutigen Thermodynamik. Nach ihrem zweiten Hauptsatz kann die Entropie (das Integral über alle Zufuhren und Abgaben von Wärme im Verhältnis zur Temperatur) nur zunehmen. Umgekehrt: nicht Energie, sondern negative Entropie (*Negentropie*) wird verbraucht: das bedeutet zugleich einen Verbrauch von "Information" (im abstrakten Sinne des Wortes). Von solchen Überlegungen gehen einige neuere Klimamodelle aus (PALTRIDGE, FORTAK).

Die regionale Verteilung dieser anthropogenen Energiezufuhr pro Kopf der Bevölkerung ist interessant genug: bei allen Industriestaaten Europas (einschließlich DDR und Tschechoslowakei) etwa 5–6 KW pro Kopf, in USA und Kanada 11–12 KW, in Afrika und Südamerika 0,4 KW, im globalen Mittel rund 2 KW. Die letzten Zahlen sind sicher zu gering, da der Verbrauch an Feuerholz in den Entwicklungsländern statistisch kaum erfaßbar ist; wenn dieser sich auf etwa 1,5 Tonnen pro Kopf und Jahr beläuft, dann entspricht das weiteren 0,7 KW/Kopf oder für etwa 2,8 Milliarden weiteren rund 2 TW (TW = Terawatt = $10^{12} W$).

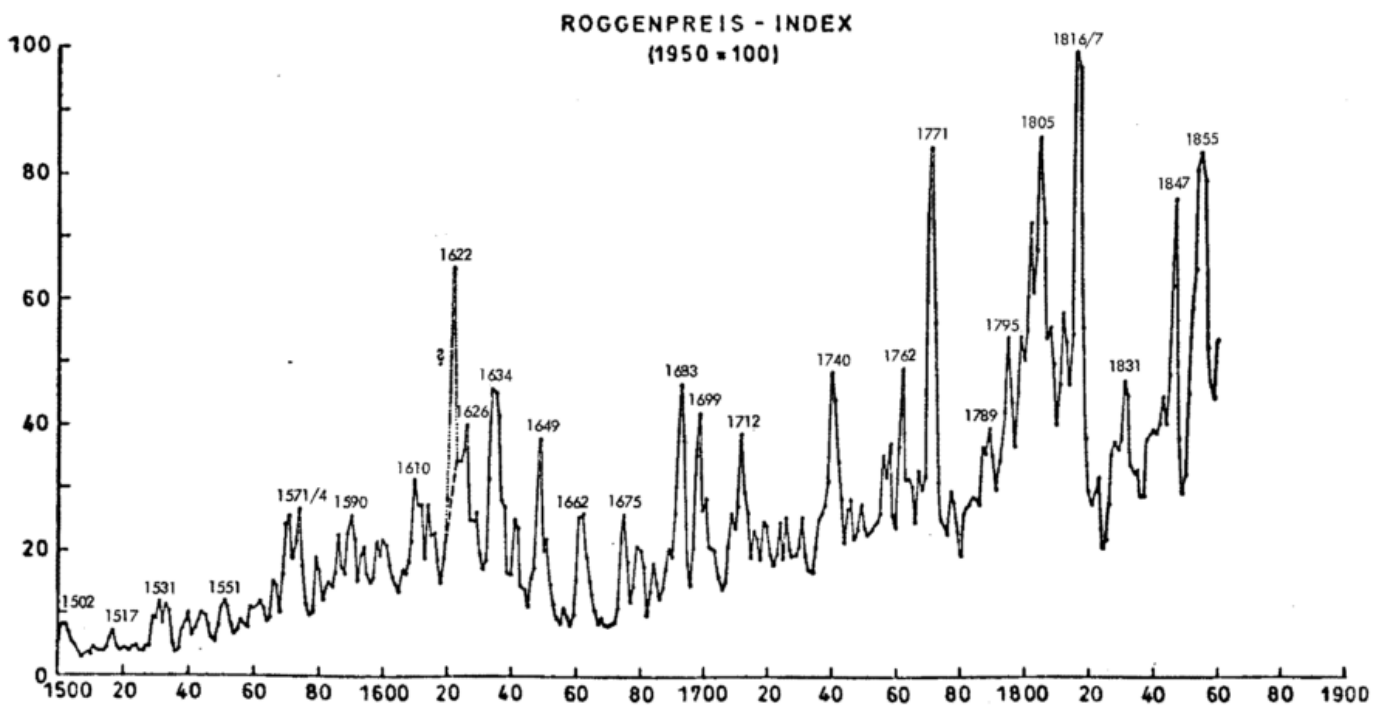


Abb. 6: Roggenpreisindex 1500 – 1860, Mittel aus 5 deutschen Städten, nach PHILIPPI

Seit 100 Jahren ist der Energieverbrauch um einen Faktor von mehr als 30 gestiegen; eine Angleichung der Lebenshaltung der Entwicklungsländer ist zwangsläufig notwendig, selbst wenn in den Industrieländern die Wachstumsraten abnehmen werden. Nachdem der derzeitige Weltverbrauch 8+2 TW beträgt, muß – bei einer (hoffentlich eintretenden) Stabilisierung der Weltbevölkerung in der Nähe von 10 Milliarden – im Laufe des 21. Jahrhunderts mit einem Ansteigen auf 35–50 TW (IIASA) entsprechend 3,5–5 KW/Kopf gerechnet werden.

In diesem Zusammenhang ist ein kurzer Blick auf die *Bevölkerungsentwicklung* notwendig, bei der jetzt erstmals Anzeichen einer Trend-Umkehr deutlich werden (Zahlen zusammengefaßt nach L.R. BROWN 1976).

Weltbevölkerung und Wachstumsrate

	Bevölkerung (10 ⁶)		Zunahme pro Jahr (%)	
	1970	1975	1970	1975
Nordamerika	226	236	0,90	0,60
West-Europa	333	343	0,56	0,32
Ost-Europa	368	384	0,84	0,86
Ost-Asien	941	1005	1,85	1,18
Südasien, Nahost	1123	1263	2,57	2,25
Afrika, Südamerika	588	672	2,69	2,68
Gesamte Erde	3594	3920	1,90	1,64

Diese Zahlen sind äußerst wichtig für alle Überlegungen über ein künftiges Energiesystem, das während der bereits beginnenden Erschöpfung der Öl- und Erdgasreserven der Erde das heutige ablösen kann; auf diese unsere wirtschaftliche Zukunft entscheidende Frage kann hier nicht näher eingegangen werden. Jedenfalls ist der Energieverbrauch an sich nur in lokalem Maßstab klimagenetisch wirksam – bei einer künftig wohl notwendigen Konzentration von Kraftwerken spielt diese Umweltverträglichkeit eine wesentliche Rolle.

Die *Luftverschmutzung* – hier zunächst die Emission von Aerosolpartikeln in die unteren Schichten (1 – 3 km) – ist in ihrer klimagenetischen Wirkung oft überbewertet worden. Die hervorragenden Aufnahmen des "Landsat"-Satelliten, mit einer räumlichen Auflösung bis herab zu 80 m (aus 960 km Höhe) zeigen, daß eine wirksame Trübung der Atmosphäre durch Industriezentren, Großstädte oder Waldbrände über Entfernungen von einigen 100 km hervorgerufen wird. Über den Trockengebieten der Erde wird mineralischer Staub durch Wind hoch aufgewirbelt – eine Folge der seit Jahrtausenden betriebenen Zerstörung der Vegetation. Diese Staubschleier sieht man im Satellitenbild von der Sahara aus quer über den Atlantik bis in die Karibik ziehen. Die Klimawirkung dieser Aerosolpartikel ist komplex: gröbere Teilchen (> 10 µm) absorbieren hauptsächlich die langwellige Ausstrahlung der Erde, erhöhen die Gegenstrahlung der Atmosphäre und erwärmen so die unteren Schichten, fallen aber relativ rasch aus. Feine Teilchen (< 2 µm) absorbieren mehr die Sonnenstrahlung, mit ähnlicher Wirkung – gleichzeitig streuen sie aber auch – gemäß den Gesetzen der Mie-Streuung – einen kleinen Teil der Sonnenstrahlung zurück in den

Weltraum, die so dem Erdboden verloren geht. Das Verhältnis Absorption/Rückstreuung hängt z.T. von der Zusammensetzung der Partikel ab, das Rückstrahlungsvermögen (Albedo) der Erdoberfläche spielt eine erhebliche Rolle. Im ganzen überwiegt aber doch offenbar der *Erwärmungseffekt*; das zeigt sich besonders im Bereich der Staubdome der Großstädte, in deren Bereich zu jeder Tages- und Jahreszeit die Temperatur höher liegt als in der Umgebung; das gleiche gilt für staubreiche Wüstengebiete wie in Pakistan.

Inzwischen scheinen die gesetzlichen Maßnahmen gegen die Luftverschmutzung wenigstens bei dem größeren Aerosol ihre Wirkung nicht verfehlt zu haben: in London haben sich die Nebel- und Sichtbedingungen seit dem Clean Air Act deutlich verbessert, in den USA ist die Staubbelastung in den Großstädten zurückgegangen, auf dem Lande allerdings leicht angestiegen. Auch in Deutschland und Japan haben sich die Verhältnisse in den schlimmsten Fällen (Mannheim-Ludwigshafen, Tokyo) offensichtlich gebessert, jedenfalls ist der SO₂-Gehalt etwas abgesunken.

Wesentlich für die Beurteilung ist der Zeitfaktor. Die Zufuhr fühlbarer Wärme (Enthalpie) wird schon in 24 – 48 Stunden durch erhöhte Ausstrahlung wieder ausgeglichen. Grobe Aerosolpartikel verbleiben im Mittel nur 2–3 Tage in den unteren Luftschichten, feine Partikel in mittleren und höheren Schichten einige Wochen, bevor sie durch Wolken und Niederschlag wieder ausgeschieden werden. Im Rahmen des globalen Wasserhaushalts liegt die mittlere Verweilzeit eines Wasserdampf-moleküls in der Atmosphäre, d.h. die Zeitspanne zwischen Verdunstung und Niederschlag, bei 9 Tagen. Ganz anders liegen die Verhältnisse bei den langlebigen Gasen; so verbleibt Kohlendioxid im Mittel 6 Jahre in der Atmosphäre.

4.2 Kohlendioxid und Spurengase

Kohlendioxid (CO₂) stellt heute einen Anteil von rund 330 ppm (10⁻⁶ Volumenteile) der Atmosphäre gegenüber 295 ± 5 ppm um 1880. Der Anteil des Sauerstoffs (O₂) beträgt in der gleichen Einheit 208100: dieses Reservoir kann also durch eine Zunahme des CO₂-Gehalts selbst um einen Faktor 10 nicht nennenswert beeinflusst werden. Über die komplexen Fragen des natürlichen und vom Menschen gestörten Kohlenstoffkreislaufsystems sowie über die möglichen klimatischen Auswirkungen einer weiteren CO₂-Zunahme berichtet in diesem Heft ausführlich C. JUNGE (S. 21 ff); hier mögen wenige Bemerkungen genügen. Das Speichervermögen von Ozean und Biosphäre wird oft überschätzt: die Masse des Ozeans unterhalb der Thermokline bzw. der Zwischenschicht in 400–600 m Tiefe nimmt nur sehr langsam an dem CO₂-Austausch teil und kann daher auch nur geringe Mengen speichern. Eine Schätzung der Food and Agricultural Organisation (FAO) ergibt einen Rückgang des äquatorialen Regenwaldes von ursprünglich 15,92 auf 9,35, 10⁶ km², heute mit einer Rate von 110 000 km² (=1,12%) pro Jahr (!). Die Zunahme der Photosynthese und damit der Netto-Produktivität der Wälder kann nur einen Bruchteil dieser Verluste wettmachen.

Die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas) liefert zur Zeit jährlich rund 5.10¹⁵ g CO₂, von dem nach neuesten Daten 53% in der Atmosphäre verbleiben;

ihr Gehalt steigt zur Zeit um 1–2 ppm pro Jahr an, wobei die Ursache der interannuellen Änderungen wahrscheinlich in der thermischen Veränderlichkeit des Ozeans in Äquatornähe zu suchen ist (s. Abschn. 2.2). Nach dem heutigen Stand der Diskussion (März 1978) wird dieser Anteil der Atmosphäre in den nächsten 3–4 Jahrzehnten etwa konstant bleiben; darüber hinaus ist eine Abschätzung schwierig.

Die klimatische Bedeutung des CO₂ liegt darin, daß es im langwelligen Infrarot, bei Wellenlängen zwischen 12 und 15 µm, eine breite Absorptionsbande besitzt. Es läßt also die Sonnenstrahlung ungehindert durch, absorbiert aber die von Erdoberfläche und Wolken abgegebene Wärmestrahlung mit ihrem Maximum bei 10 µm. Das ist der sogenannte "Glashauseffekt"; dieser Begriff ist physikalisch etwas schief, weil ein Glasfenster nicht nur für infrarote Strahlung, sondern auch für den turbulenten Wärmeaustausch undurchlässig ist (was erst die Wärmespeicherung im Glashaushalt erklärt), aber er läßt sich wegen seiner Anschaulichkeit kaum mehr ausrotten. Die klimatische Folge einer Zunahme des CO₂-Gehaltes ist eine Erwärmung der Troposphäre, die nach oben abnimmt und in der Stratosphäre

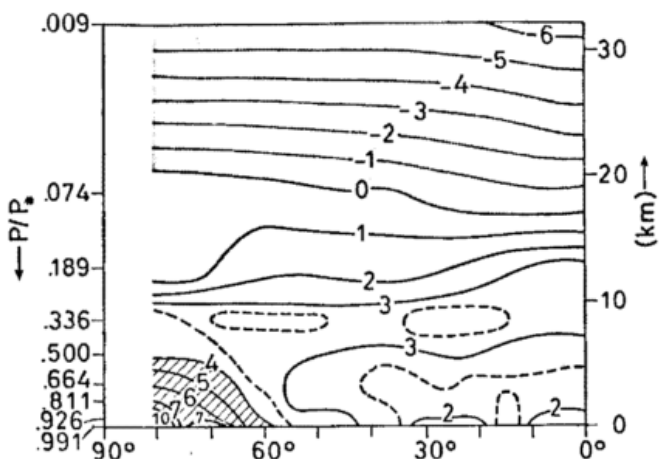


Abb. 7: Temperaturänderung bei Verdoppelung des CO₂-Gehaltes, Modell MANABE-WETHERALD 1975

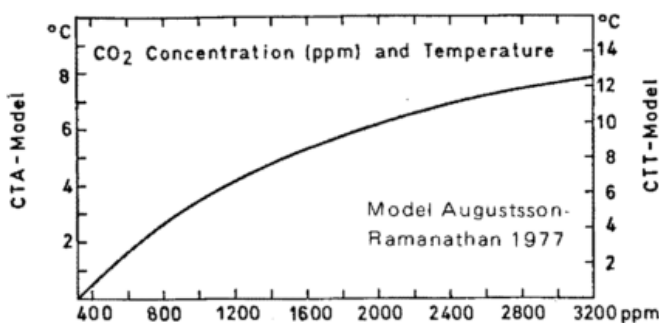


Abb. 8: Temperaturänderung (außer Polargebiet) mit zunehmendem CO₂-Gehalt. Skala links mit konstanter Höhe (CTA), rechts mit konstanter Temperatur (CTT) der Wolkenobergrenze, Modell AUGUSTSSON-RAMANATHAN 1977

in eine Abkühlung übergeht. Zahlreiche, immer weiter verfeinerte Modelle haben diesen Effekt bestätigt; ältere müssen wegen unrealistischer Annahmen ausgeschaltet werden. Der Betrag der Erwärmung hängt von der Zunahme des Wasserdampfgehaltes (dessen Absorptionsbanden z.T. die des CO₂ überdecken) mit steigender Temperatur, und von der (nicht genau bekannten) Wechselwirkung

mit der Bewölkung ab. Aber die besten Modelle, (MANABE-WETHERALD 1975, AUGUSTSSON-RAMANATHAN 1977), die den Wasserdampfeffekt mit berücksichtigen (Abb. 7, 8), geben übereinstimmend für eine Verdoppelung des CO₂-Gehaltes (von 300 auf 600 ppm) eine mittlere Erwärmung in Bodennähe um 2–3°C an, die im Polargebiet (wenn man die Rückkopplung zwischen Rückstrahlung (Albedo), Schneedecke und Temperatur in Rechnung stellt) auf 7–10°C anwächst. Diese Erwärmung erfolgt anfangs nahezu linear, bei weiter steigendem CO₂-Gehalt etwas langsamer, aber selbst bei einer Zunahme um den Faktor 10 tritt noch keine Sättigung auf; die Erwärmung beträgt dann schon außerhalb der Polargebiete 8–12°C! Eine CO₂-Zunahme auf das 5–10fache ist nicht unrealistisch: bei unkontrolliert steigendem Gebrauch fossiler Brennstoffe, insbesondere bei einem erzwungenem Verzicht auf Kernenergie, können solche Werte durchaus erreicht werden, wie alle Modellrechnungen aus neuester Zeit übereinstimmend ergeben.

Die Situation, die von den führenden Energiefachleuten der Welt sehr ernst genommen wird, verschärft sich noch durch den Befund, daß einige andere von Menschen produzierte Spurengase ebenfalls im Infrarot absorbieren, und zwar ausgerechnet in dem noch durchlässigen "Fenster" zwischen 7,5 und 12 µm. Zu diesen Spurengasen zählt nicht nur das Ozon (O₃), – auf dieses (m.E. etwas überschätzte) Problem kann hier nicht näher eingegangen werden –, sondern auch Distickstoffoxid (N₂O), Methan (CH₄), die Frigene (C Cl₂F₂ und C Cl₃F), Schwefeldioxid (SO₂), Ammoniak (NH₃) u.a., die alle in steigendem Ausmaß vom Menschen erzeugt werden. Am wichtigsten erscheint das N₂O (HAHN und JUNGE) als ein Endprodukt der stickstoffhaltigen Düngemittel, deren Produktion in den letzten 15 Jahren jährlich um über 10% zugenommen hat; ihnen verdanken wir in der Hauptsache, daß die Nahrungsmittelproduktion bisher noch mit der Bevölkerungszunahme Schritt halten konnte. Die Frigene (Chlorofluormethane) sind die Treibstoffe der Aerosolsprühdosens und werden auch in Kühlschränken verwertet – ihre Jahresproduktion nähert sich 10⁶ Tonnen, und ihre Verweilzeit in der Atmosphäre liegt infolge ihrer chemischen Trägheit bei 30–70 Jahren. In Schweden und Oregon sind sie inzwischen verboten; weitere Länder dürften folgen.

Alle diese Gase addieren sich – da ihre schmalen Absorptionsbanden sich nicht überlagern (WANG 1976) – zu dem Glashauseffekt des CO₂; eine konservative (!) Schätzung ergibt eine Verstärkung des CO₂-Effektes um 50%. Der Verbrauch fossiler Brennstoffe nimmt sicher nicht mehr lange exponentiell zu, da als Folge der beginnenden Erschöpfung der Erdöl- und Erdgaslager die Preise steigen werden. Bei begrenzten Vorräten ergibt sich eine Zunahme des Verbrauchs nach einer "logistischen" Funktion: ist ein Vorrat F (hier gleich 100% gesetzt) begrenzt, dann kann man annehmen, daß der Verbrauch sich (mit wachsendem Preis) proportional zu dem noch vorhandenen Vorrat $1-F$ ändert ($c = \text{Konstante}$):

$$\frac{1}{F} \frac{dF}{dt} = c(1-F).$$

Daraus ergibt sich die logistische Funktion

$$F^{-1} = 1 + \exp[-c(t-t_{0,5})]$$

mit dem Zeitpunkt $t_{0,5}$, in dem 50% von F aufgebraucht ist. Ihr Verlauf ähnelt einem in die Breite verzerrten S (Sigmoid), und wir nähern uns offenbar rasch dem Wendepunkt.

Da die Intensität des Glashauseffektes in erster Linie von der Zunahme des CO_2 -Gehaltes abhängen wird, kann man diese mit der der erwähnten Spurengase kombinieren; es ergibt sich ein "virtueller" CO_2 -Gehalt. Dann kann die Klimawirkung in Abhängigkeit vom realen CO_2 -Gehalt ausgedrückt werden: das erlaubt eine *Abschätzung der repräsentativen Temperaturzunahme* (mit Ausnahme der Polargebiete) als Funktion des CO_2 -Gehaltes bzw. der Zeit. Zu den Voraussetzungen gehört, daß die CO_2 -Wachstumsrate unter Einbeziehung der Entwicklungsländer mit ihrem Nachholbedarf nicht rasch sinken kann, und daß keine andere Energiepolitik das CO_2 -Risiko ganz ausschalten wird. Unter diesen Voraussetzungen läßt sich abschätzen, daß eine Temperaturzunahme um $1,5^\circ\text{C}$ (entsprechend der wärmsten Periode der Nacheiszeit vor rund 6000 Jahren) schon zwischen 2005 und 2015, eine solche um $2,5^\circ\text{C}$ (entsprechend dem wärmsten Abschnitt der letzten Zwischeneiszeit, s. Abschn. 6) schon in etwa 50 Jahren erreicht werden kann. Die kritische Phase, bei der bei einer Erwärmung um 4°C möglicherweise das arktische Treibeis wegschmelzen wird, könnte trotz verlangsamter Wachstumsrate zwischen 2040 und 2075, d.h. in weniger als 100 Jahren eintreten. Die entsprechenden Schwellenwerte des "realen" CO_2 -Gehaltes liegen für eine Erwärmung um $1,5^\circ\text{C}$ ($2,5^\circ$, 4°) bei rund 450 (550, 750) ppm mit einer Fehlerbreite von $\pm 10 - 15\%$.

4.3 Die Albedo und das Wüstenproblem

Eine der wichtigsten Größen im Wärmehaushalt der Erdoberfläche ist die *Albedo der Erdoberfläche* A_E , der Anteil der reflektierten Strahlung an der einfallenden Globalstrahlung G , der Summe aus der direkten Sonnenstrahlung und der diffus gestreuten Strahlung des Himmels und der Wolken. Hierüber berichten in diesem Heft BAUMGARTNER, KIRCHNER und MAYER (S. 32 ff). Die mittlere Albedo der Erdoberfläche liegt (nach einer besonders gründlichen Auswertung von Landsat-Aufnahmen in mehreren Spektralbereichen durch HUMMEL und RECK) bei $14 \pm 0,5$ Prozent. Aus einem der besten Strahlungsmodelle (MANABE und WETHERALD 1967) ergibt sich bei einer Zunahme der mittleren Albedo von 1% eine Abnahme der Gleichgewichtstemperatur um $1,3^\circ\text{C}$. Fast immer führt die Umwandlung bzw. *Zerstörung der ursprünglichen Vegetation* zu einer *Zunahme der Albedo*; dies ist offenbar der einzige wichtige Eingriff des Menschen, der zu einer *Abkühlung* führen kann. Diese Prozesse erfassen zwar riesige Flächen (landwirtschaftliche Nutzfläche und Weideland, zusammen 38% der Kontinente), aber sie vollziehen sich langsam, schon seit der neolithischen Revolution vor 5–7000 Jahren; heute beschleunigen sie sich mit der Bevölkerungszunahme.

Eine entscheidende Rolle spielen die Vorgänge, die als *Desertifikation* bezeichnet werden; ein passendes Wort in deutscher Sprache hierfür müßte erst neu gebildet werden. Die Vegetationszerstörung an den Rändern der Sahara ist in der Tat alarmierend; die UN-Konferenz über "Desertification" (Nairobi 1977) hat sie der Weltöffentlichkeit

klar vor Augen geführt. Überall in den Tropengebieten, auch in den semiariden und semihumiden Gebieten mit einer mehrmonatigen Regenzeit, geht die Vegetation in den Weidegebieten rasch zurück. In den Ländern des Maghreb (Tunesien, Algerien, Marokko), in Libyen und im Sudan liegen verlässliche Schätzungen vor: im Mittel rückt die Wüste um 1 – 2 km jährlich vor. Das bedeutet allein bei der Sahara in jedem Jahr eine Zunahme um über 20.000 km². Dies ist *keinesfalls die Folge einer Klimaänderung* – das konnte in Tunesien, in Rajasthan, im Sahelgürtel einwandfrei nachgewiesen werden. Es ist vielmehr das Resultat der vom *Menschen veranlaßten*, über Jahrtausende fortgesetzten *Eingriffe in die natürlichen Haushalte*: erst die Vernichtung der Großtierherden und der Raubtiere, dann die Nutzung der natürlichen Savannen und Grasländer als Weideland für Rinder, Kamele, Schafe und Ziegen, dazu das jährlich wiederholte Abbrennen des Grases – so wurden die Trockenwälder in Dornsavannen umgewandelt –, zuletzt die Überstockung der Grasländer mit wachsender Bevölkerungsdichte. In den Ländern der Sahelzone ist die Zahl des Weideviehs in den Jahren 1949 – 68 auf das Sechsfache vermehrt worden; hier treten Feucht- und Dürrejahre meist in Gruppen auf, und die Dürre 1969 – 73 hat sich 1977 wiederholt. Die große natürliche Veränderlichkeit der Regenfälle von Jahr zu Jahr führt immer wieder zu einer Vermehrung des Weideviehs über das ökologische Gleichgewicht hinaus, das damit nachhaltig gestört wird. Hierzu kommt noch die Nutzung der letzten Bäume und Sträucher als Feuerholz (s. Abschn. 4.1). Daß hierdurch selbst in semihumiden Gebirgsländern wie im Hindukusch oder in Nepal eine völlige Waldzerstörung in Gang kommt, ergibt der Augenschein schon bei flüchtigem Besuch.

Eine Modellrechnung von CHARNEY (1975) hat nun gezeigt, daß in dem Wüstengürtel der Erde wegen der hohen Albedo der Erdoberfläche der extraterrestrische Strahlungshaushalt negativ wird, daß dieses Defizit durch advektive Wärmezufuhr und Absinken der Luft ersetzt werden muß, und daß die Zunahme der Albedo durch Vegetationszerstörung dieses Absinken nur noch verstärkt. Das führt zu einem weiteren Rückgang der Niederschläge und zu verstärkter Wüstenbildung. Sicher handelt es sich hier um einen schwachen, erst in langen Zeiträumen und über großen Gebieten wirksamen Prozess, der die naturbedingte Trockenheit im Bereich der subtropischen Hochdruckzellen noch verstärkt – andere Modellrechnungen und Auswertungen von Satellitenbildern haben diese Überlegungen bestätigt. Sicher sind die großen Wüsten der Erde nicht erst vom Menschen geschaffen worden, aber ihre Intensivierung und Ausweitung ist ein Produkt menschlicher Eingriffe. An mindestens drei Stellen (bei Jodhpur mit rund 270 mm Regen im Jahr, bei Khartum-Omdurman mit 160 mm und bei Nefta in Tunesien mit 70 mm) zeigen eingezäunte Gebiete, daß die vor den Weidetieren geschützte, ursprüngliche Vegetation eine völlig andere Albedo hat, als die umgebende Wüste. Ein Effekt auf die Niederschläge läßt sich aus den (erst nach 1900 einsetzenden) Messungen zwar nicht nachweisen, wohl aber aus den historischen Nachrichten aus dem Wüstengürtel, aus den Berichten der frühen Reisenden über die Dauer der Regenzeit, über die Existenz von Brunnen und regelmäßig abkommenden Flüssen: noch im frühen Mittelalter sind arabische Reisende quer durch die Sahara mit Pferden gezogen (über historische Klimaschwankungen natürlicher Herkunft s. Abschn. 6 und 8).

5 Das Problem der Klimavorhersage: Stand und Aufgaben

5.1 Modellrechnungen

Was können wir über die Zukunft unseres Klimas voraussagen? Was wissen wir über die Ursachen der Klimaschwankungen der Vergangenheit? Immerhin wachsen unsere empirischen Kenntnisse über die Klimageschichte rasch an und erfassen die letzten 10 000 Jahre schon recht gut, die letzten 700 000 Jahre immerhin schon in den Grundzügen; die Umriss der Geschichte der letzten 500 Millionen Jahre beginnen ebenfalls sichtbar zu werden (SCHWARZBACH). Eindeutige Zusammenhänge mit den natürlichen Ursachen sind bisher höchstens vereinzelt nachgewiesen; eine Vorhersage dieser extremen Ursachen (Abschn. 3) ist bisher unmöglich.

Physikalisch-mathematische Klimamodelle sind bisher vielfach nur in der einfachsten Form (0- oder 1-dimensional) erörtert worden. 2- oder 3-dimensionale Zirkulationsmodelle der Atmosphäre gibt es in den verschiedensten Formen. Gemeinsam ist ihnen die Ableitung der Felder Wind, Luftdruck, Temperatur auf der Grundlage vorgegebener Randbedingungen, so der Temperatur der Ozeanoberfläche, der mittleren Bewölkung u.a. Damit sind aber die für das Klima entscheidenden Wechselwirkungen fest vorgegeben; schon die Behandlung des jährlichen Ganges ist mit einem solchen Ansatz unmöglich, erst recht natürlich die Vorhersage von interannuellen Änderungen oder Klimaschwankungen. Die *Wechselwirkung Atmosphäre – Ozean* ist bisher in nur einem stark idealisierten Modell (MANABE und BRYAN) einbezogen worden; andere Modelle behandeln den Ozean als bewegungslosen Sumpf, der Wärme und Wasserdampf abgibt bzw. aufnimmt. Sicher sind diese Ansätze vielversprechend; sie liefern immerhin ein ziemlich realistisches Bild der großen Strömungssysteme der Atmosphäre, der hydrologischen Bilanz Niederschlag – Verdunstung und der Energieumsetzungen innerhalb der Atmosphäre. Aber schon eine Umsetzung der Zahlenwerte für die Landoberfläche in regionalen Klimatypen zeigt die Unvollkommenheit dieser Art von Modellen: da erhalten Texas und Südchina ein Wüstenklima, oder in der Sahara fallen 1500 mm Niederschlag, am Rande des Himalaya dagegen weniger als 50 mm. Natürlich geben solche Fehler Anlaß zur Verbesserung der Modelle; diese aber finden heute weniger in der Physik als vielmehr in der Leistungsfähigkeit der Computer und dem Aufwand an Rechenzeit ihre Grenze. Auch wissen wir heute, daß die meisten Modelle (wegen in ihnen enthaltenen mathematischen Näherungen) auch bei gleichen Anfangsbedingungen verschiedene Ergebnisse liefern. Modellexperimente liefern daher keine Abbilder der Wirklichkeit, sondern sind Testversuche über die Sensitivität der Modelle selbst. Der entscheidende Einwand ist aber, daß es bisher noch nicht gelungen ist, die Summe der zeitabhängigen Vorgänge in Ozean, Eis und Atmosphäre und ihre wesentlichen Wechselwirkungen in ein Modell einzubauen. Keiner der hervorragenden "Modellbauer" macht sich Illusionen über die Schwierigkeiten im Detail; eine befriedigende Lösung wird wohl kaum vor 10 Jahren gefunden werden können, und auch dieses Datum mag noch zu optimistisch sein.

Andere Modelltypen sind vorgeschlagen worden: *statistisch-dynamische Modelle*, die zeitabhängige Parameter unter Verzicht auf Detail als Statistiken behandeln, und

stochastische Modelle, bei denen die wirksamen langfristigen Prozesse im Ozean und im Eis von der kurzlebigen Atmosphäre her angetrieben werden (HASSELMANN und Mitarbeiter).

Alle diese Versuche sind notwendig und nützlich, soweit sie unsere Kenntnisse über die Wechselwirkungen im klimatischen System und ihre Auswirkung erweitern: erst wenn wir diesen komplexen Wirkungsmechanismus voll verstehen, können wir ihn so vereinfachen, daß wir ein genügend realistisches und doch noch traktables Klimamodell aufbauen können. Ein entscheidender Test ist die Simulation des jährlichen Ganges (z.B. WETHERALD – MANABE 1972): diese jahreszeitliche Änderung der Zirkulation ist eher noch großartiger als die stärksten Klimaschwankungen der Vergangenheit, wie etwa eine Eiszeit, für die GATES (1976) ein Zirkulationsmodell mit gegebenen Randbedingungen entwickelt hat.

5.2 Zur Frage der Vorhersagbarkeit

Solange die Hauptursachen der Klimaschwankungen in der Vergangenheit – zunächst jedenfalls – als unvorhersagbar gelten müssen, bleibt eine ernstzunehmende Prognose etwa für das Klima der Periode 2100–2150 AD unmöglich. Das muß ganz nüchtern gesehen werden, selbst wenn die eben erörterten Schwierigkeiten beim Aufbau eines geeigneten Modells voll befriedigend gelöst werden können. Aber ein Ausweg ist möglich, der immerhin eine *bedingte Vorhersage* – in der Literatur als Vorhersage "zweiter Art" bezeichnet – ermöglicht. Setzen wir einmal voraus, daß die unvorhersagbaren Prozesse so weiterlaufen, wie in den letzten (rund) 5000 Jahren – genauer seit dem Verschwinden der letzten Reste der kontinentalen Inlandeisdome auf Labrador. Dann können wir mit Modellrechnungen untersuchen, wie dieses klimatische System auf Änderungen der Randbedingungen – z.B. auf eine Änderung des CO₂-Gehalts, des Aerosolgehalts der unteren Troposphäre oder der Stratosphäre (Vulkane!), der Oberflächenalbedo – reagiert. Solange kein wirklich "komprehensives", alle Untersysteme mitumfassendes Modell des klimatischen Systems existiert, sollte das in sorgfältig geplanten Parallelversuchen mit den heute verfügbaren Modellen bzw. den noch verbesserten Versionen durchgeführt werden.

Parallel hierzu muß aber ein vertieftes Studium charakteristischer Stadien der Klimate der Vergangenheit treten: das liegt auch im Interesse der Modellbauer. Es gibt nur eine Möglichkeit, die Eignung eines Modells zur Klimavorhersage zu erproben: die Simulation der Klimate der Vergangenheit und ihrer zeitlichen Entwicklung. Aber auch unabhängig davon geben uns diese Paläoklimate Hinweise darauf, wie das Klima unserer Erde auch aussehen könnte. Denn hier versagt offenbar – jedenfalls gilt dies für die Mehrzahl der Meteorologen – unser Vorstellungsvermögen; nur so ist das (fast irrationale) Festhalten an der Überzeugung von der Konstanz unseres Klimas zu erklären, trotz all unserer Erfahrung mit extremen Wetterlagen.

Stellen wir nur die in der Vergangenheit wirksamen Klimafaktoren in Rechnung, dann müssen wir uns fragen: wie sah das Klima aus, als unsere Alpengletscher den vielerorts im Gelände noch sichtbaren Höchststand (mehrfach in der Zeit zwischen 1610 und 1855) erreicht hatten? Das war die "kleine Eiszeit" (s. Abschn. 7); sicher müßte der Über-

gang zu der nächsten Eiszeit von einem solchen Stadium ausgehen, und wir müssen die Frage nach der Natur dieses Übergangs erörtern. Stellen wir im Gegensatz hierzu die anthropogenen Faktoren in den Vordergrund, die offenbar in ihrer Gesamtheit zu einer globalen Erwärmung führen (s. Abschn. 4.1, 4.2), dann können wir die Warmphasen der Vorzeitklimata untersuchen und als Beispiel für die in Zukunft zu erwartenden Zustände nehmen. Natürlich müssen wir uns auch die Frage stellen: kann sich das Klima der Vergangenheit wiederholen, oder haben sich die Randbedingungen inzwischen geändert? Nachdem wir heute wissen, daß es in "jüngerer" Vergangenheit nicht eine oder vier, sondern mindestens 17 Eiszeiten und ebenso viele Warmzeiten globalen Ausmaßes in 1,8 Millionen Jahren gegeben hat (FINK und KUKLA), stellt sich dieses Problem in aller Schärfe. Auch die Geschichte des Menschen wiederholt sich nie auf völlig gleiche Art.

Solange wir also keine physikalisch einwandfreien, genügend realistischen Klimamodelle zur Verfügung haben, müssen wir uns mit dem Vergleich vergangener Zustände, aber mit aller gebotener Kritik und Vorsicht, behelfen. Diese Art der Darstellung *möglicher*, aber keinesfalls gesicherter Zustände bezeichnet man (in der sehr umfangreichen Literatur über Zukunftsfragen) als *Szenarium*, als Drehbuch für einen Film. Das ist eine äußerst unglückliche Bezeichnung: unsere Darstellung entspringt niemals allein schöpferischer Phantasie, sondern beruht ausschließlich auf den kritisch durchgeprüften Grabungsergebnissen der Vergangenheit — alles was früher schon einmal geschehen ist, kann wieder geschehen, sofern die gleichen Randbedingungen gegeben sind. Hierfür geben uns die vorliegenden Modelle wertvolle Hinweise. Andererseits müssen wir stets die *natürlichen* Schwankungen des Klimas (mit einer Größenordnung von $\pm 0,6^\circ\text{C}$ für die globale Mitteltemperatur, gegeben für einen z.B. 100jährigen Mittelwert) mit in Rechnung stellen: sie addieren sich zu den *anthropogen* verursachten Schwankungen. Jedem mit der Klimavergangenheit nicht vertrauten Leser sollte das Studium des großen zweibändigen Werkes "Climates: Past, Present and Future" von H. LAMB dringend empfohlen werden.

Für den folgenden Abschnitt 6, die Erörterung *globaler Warmphasen als Beispiele für mögliche Klimazustände unter anthropogenem Einfluß* müssen wir folgende einschränkende Voraussetzungen machen (s. Abschn. 2.3 und 3):

- a) Konstanz der Solarkonstanten (innerhalb der heutigen Meßgenauigkeit),
- b) keine Häufung stärkerer Vulkanausbrüche,
- c) kein großskaliger Ausbruch des Westantarktiseises,
- d) keine Änderung der mittleren Bewölkung.

Die letzte Einschränkung bezieht sich auf unsere mangelhaften Kenntnisse über die Rolle der Bewölkung im Strahlungshaushalt. Zweifellos wäre schon eine geringe Zunahme der Bewölkung (z.Z. nach Bodenbeobachtungen ca. 52%, nach Satellitendaten ca. 30% — beides mit systematischen, gegeneinander wirkenden Fehlern behaftet) für den Wärmehaushalt von entscheidender Bedeutung. Doch ist das unwahrscheinlich (CESS); der größte Teil der Wolken entsteht in aufsteigenden Luftströmungen und löst sich bei Absinken auf, bleibt also als Folge des Kontinuitätssatzes etwa erhalten. Die stabilen Inversionen

aber dürften bei einer CO_2 -Zunahme wegen der wachsenden Labilität der Schichtung eher abnehmen.

6 Warmphasen in der Klimageschichte

6.1 Frühmittelalterliche Wärmeperiode

Da eine Rückkehr zu einer rein naturbedingten Klimaentwicklung ebenso unmöglich ist, wie eine Rückkehr zu den Lebensbedingungen der Jungsteinzeit für eine Erdbevölkerung von über 4 Milliarden, müssen wir mit einer globalen Erwärmung rechnen. Dem widerspricht die Abkühlung der Periode 1945–72 in mittleren und hohen Breiten der Nordhalbkugel nur scheinbar: in niedrigen Breiten blieben die Temperaturen fast konstant, in gemäßigten Breiten der Südhalbkugel und am Rande der Antarktis sind sie sogar leicht angestiegen. Einer CO_2 -Zunahme von 12–13% entspricht eine globale Temperaturzunahme um $0,2^\circ\text{C}$ — dies liegt noch ganz im Bereich des statistischen Rauschens, d.h. der interannuellen Variabilität. Die beobachtete Abkühlung kann offenbar mindestens teilweise auf die seit 1955 wieder auflebende Vulkantätigkeit (nach einer Pause 1912–1948) zurückgeführt werden. Das Argument, daß ohne die inzwischen erfolgte CO_2 -Zunahme die Abkühlung entsprechend stärker gewesen wäre, läßt sich weder beweisen noch widerlegen — es steht jedenfalls im Einklang mit den zuverlässigsten Strahlungsmodellen. Wir betrachten also zunächst — als Beispiel für eine künftige Klimaentwicklung — einige Warmphasen aus der Klimageschichte, ohne daß hier auf die Art der Quellen und ihre Kritik eingegangen werden kann (vgl. die Monographien von SCHWARZBACH und LAMB).

Die erste wichtige Warmphase ist das frühe Mittelalter, etwa die Periode 900 — 1050 unserer Zeitrechnung. Sie ist zwar in Mitteleuropa durch historische Daten wenig belegt; das umfangreiche Werk von H. LAMB enthält eine Zusammenstellung aller erreichbarer Daten, die inzwischen fortlaufend ergänzt werden. In dieser Zeit scheinen sich (die vorsichtige Ausdrucksweise ist wegen der noch allzuoft unkritischen Auswertung historischer Quellen notwendig) in weiten Teilen Europas warme Sommer und Dürreperioden zu häufen. Die wichtigsten Befunde ergeben sich aus der Siedlungsgeschichte der Wikinger in Island und Grönland, mit ihren kühnen Vorstößen nach Labrador und Neufundland. Diese Auswanderer (aus politischen Gründen) trafen ab 874 Island zu etwa 60% bewaldet an; sie trieben dort nicht nur Schafzucht, sondern auch Getreidebau (wie übrigens damals in Norwegen bis zum 65. Breitengrad). Sie überquerten die Dänemarkstraße an der schmalsten Stelle, ohne den heutigen Treibeisgürtel anzutreffen, und errichteten Siedlungen in Süd- und Westgrönland; die Friedhöfe dieser Siedlungen liegen heute im Dauerfrostboden. War der Ostgrönlandstrom damals in 65°N eisfrei, dann muß das bei dessen hoher Geschwindigkeit (im Vergleich zur Abschmelzzeit der Eisschollen) für seine gesamte Länge zutreffen: die arktische Treibeisgrenze lag also damals an der Nordküste Grönlands, d.h. in 80 – 81°N Breite. Erst um 1330 liegt ein zeitgenössischer Bericht vor, daß das vorgerückte Eis zur Aufgabe dieses Schifffahrtsweges geführt hat; zugleich verschlechterten sich die Klimabedingungen in Grönland und Island, wo der Getreidebau aufgegeben werden mußte. Archäologische Forschung hat zeigen können, daß um 1000 die Eskimos den ganzen arktischen Archipel Kanadas besiedelt hat-

ten, ebenso die Neusibirischen Inseln. In diesen heute menschenleeren Einöden lebten sie von Walfang — dieser setzt offenes Wasser im Sommer voraus. Die gleiche Klimaverschlechterung zwang sie zum Ausweichen nach Süden, und Zusammenstöße mit den durch Hunger und Seuchen dezimierten norwegischen Siedlern in Südgrönland führten zu deren Vernichtung.

Die Waldgeschichte Kanadas und Europas, die Gletscher- geschichte der Alpen belegen um 1000 eine Erwärmung um etwa 1°C; das Kaspische Meer erreichte einen seiner tiefsten Stände bei -32 m, d.h. niedriger als heute, wo viel Wasser zu Bewässerungszwecken verwendet wird. Der Nordteil der Sahara war feuchter als heute; arabische Reisende berichteten sogar aus dem heute trockensten Gebiet (Kufra) von einer gerade erst aufgegebenen Rinderzucht — man wird die Niederschläge damals doch auf 150–200 mm/Jahr schätzen müssen gegenüber 3–5 mm heute. Aber aus dem Mittelmeerraum wird von einzelnen überaus kalten Wintern berichtet, ebenso hatten China und Japan warme Sommer, aber auch strenge Winter, in denen die großen Fluß-Seen am Jangtsekiang zufroren. Im mittleren Westen der USA herrschten günstige Bedingungen für Ackerbau, Jagd und sogar städtische Kultur, während um 1200 Serien von Dürren zur Aufgabe von Gebieten zwangen. Daß diese Dürreperiode hier, im heutigen Maisanbaugürtel, 200 Jahre anhielt (Bryson und Murray), muß besonders beachtet werden: Der mittlere Westen Nordamerikas ist z.Z. das einzige Gebiet mit Getreideüberschuß, während viele andere Länder von Importen, d.h. von der Hand in den Mund leben . . .

Eine Zusammenschau dieser (und anderer) Daten führt zu der Vorstellung (LAMB), daß wie in den heißesten Sommern der Periode 1931–60 die Zyklonenzugbahnen der Westdrift durch quasi-stationäre Hochdruckgebiete um 300–500 km nach N verlagert waren. Auch im Winter ergab sich eine ähnliche Situation, die aber mit blockierenden Hochs zu häufigen Kälteperioden führte. Während im Eis Grönlands bereits eine vorübergehende Abkühlung um 1160 eintrat, die auch von Schweizer Gletschern belegt ist, war die nächste Kältewelle mit dem Höhepunkt um 1320 noch nachhaltiger wirksam; alle Warmphasen seit dieser Zeit haben nicht die Andauer und Intensität derjenigen um die Jahrtausendwende erreicht. Für sie kann ein Anstieg der repräsentativen Temperaturen um etwa 1°C angesetzt werden, die in der Arktis vermutlich 2–3°C erreicht haben dürfte. Von der Südhalbkugel liegen kaum Daten vor, außer einer Trockenperiode in Neuseeland zur Zeit der Maori-Einwanderung.

6.2 Die holozäne Wärmeperiode vor 6000 (bzw. 4000) Jahren

Nach dem Höhepunkt der letzten Eiszeit (18000 vh = vor heute) dauerte der Eisrückzug in den beiden Nord-Kontinenten verschieden lang: das Skandinavische Inlandeis verschwand endgültig kurz vor 8000 vh, während zugleich das Laurentische Eis Nordamerikas noch die Hudsonbucht mit allen Nachbarländern bedeckte, mit noch etwa 50 Prozent seiner ursprünglichen Fläche. Nach einem katastrophalen Einbruch des Meeres in die Hudsonbucht verschwand das Eis im Westen relativ rasch, in Labrador anscheinend erst um 4500 vh, während in Baffinland ausge- dehnte Plateaugletscher bis heute überlebten. Das führte

in der Zeit 8000–4500 vh zu einer permanenten Anomalie der Zirkulation von Atmosphäre und Ozean, über Europa zu einer zusätzlichen advektiven Erwärmung mit einem ersten Höhepunkt um 6000 vh, einem zweiten ab etwa 4500 vh, nach einer kurzen, intensiven Abkühlung um 4800 vh, während das östliche und zentrale Nordamerika noch relativ kühl blieb. Offenbar lagen auch Alaska und das westliche Nordamerika unter dem Einfluß eines warmen Hochdruckrückens: längs 100°W dehnte sich der boreale Wald etwa 300 km weiter nach N aus als heute, ja vor 4800 vh sogar bis zur Banks-Insel (74°N). Ähnliche Befunde liegen von Nordnorwegen und der westsibirischen Taiga vor, die eine Erwärmung um 2 bis 3°C andeuten; im globalen Mittel ergibt sich eine Erwärmung um etwa 1,5°C. In der inneren Arktis waren selbst die Nordküsten von Spitzbergen, Grönland und Ellesmere-Land im Sommer eisfrei, während der Kernbereich des arktischen Treibeises zwischen Nordkanada und Ostsibirien sicher erhalten blieb.

Die Vegetationsgeschichte von Eurasien (FRENZEL) zeigt diese Warmphase klar; hierbei darf man nicht vergessen, daß die Einwanderung von Waldbäumen erheblich längere Zeit benötigt als die dafür verantwortliche Klimaänderung. Von besonderer Bedeutung ist dabei in Ostsibirien, offenbar auch in Kanada und Alaska ein Rückzug des Dauerfrostbodens um mehrere 100 km nach Norden; in den Gebirgen rückte die Waldgrenze überall um 100–150 m aufwärts. In den Alpen läßt sich das mit vielen Einzelheiten belegen (PATZELT), aber im Gegensatz zur Subarktis kam es hier in der Periode zwischen 8000 vh und 800 vh zu mindestens vier Wärmeperioden und zwischengeschalteten Kaltphasen, mit Gletschervorstößen von jeweils fast gleicher Intensität. Für die Temperaturverhältnisse der Ozeane sind nur wenige Angaben vorhanden — die zeitliche Auflösung der Ozeanbohrkerne liegt meist bei 3–5000 Jahren, als Folge der geringen Sedimentationsrate und der biogenen Durchwühlung des Meeresbodens. Nur für den Kuroshio zwischen Taiwan und der japanischen Südküste wird eine Erwärmung um 6°C angegeben.

Die auffälligste Erscheinung ist eine verbreitete *Zunahme der Niederschläge*, mit nur zwei sicheren Ausnahmen: In Westsibirien sowie im Mittelwesten der USA (Wisconsin — Illinois) weitete sich das trockene Grasland nach N bzw. E hin aus. Überall sonst, besonders auffällig im Trockengürtel der Alten Welt von Mauretanien (17°W) bis nach Rajasthan (77°E), herrschte ein feuchteres Klima als heute: in der Sahara ist es an mehr als 30 fossilen Seen und Flüssen einwandfrei belegt, ebenso in der Danakilwüste, in der arabischen Wüste, aber auch im SW Nordamerikas, im ostafrikanischen Graben und in weiten Teilen Australiens. Zwei Gebiete sind besonders gut belegt: in Rajasthan (BRYSON) schwankte die Regenmenge zwischen 400–600 mm (zeitweise über 800 mm) von etwa 10 500 vh bis rund 3700 vh, gegenüber rund 250 mm heute, und der Tschadsee, heute ein flaches, von Dünen durchsetztes Seebecken von maximal 23000 km², dehnte sich zweimal (um 8500 und um 5800 vh) auf über 320000 km² aus (MALEY), mit einem Spiegel über 40 m höher als heute und einer maximalen Tiefe von etwa 200 m. Das zentrale Trockengebiet zwischen Kufra und Tibesti, heute mit weniger als 5 mm/Jahr, war z.T. von dauernd fließenden Flüssen durchzogen. Das Grasland wurde genutzt von offenbar zahlreichen rinderzuchtenden Nomaden, und die jährlichen Nieder-

schläge werden auf 200–400 mm geschätzt (PACHUR, GABRIEL), im Tibestigebirge (heute 100 mm) auf über 800 mm. Besonders auffällig ist, daß in dieser Feuchteperiode sowohl die Nord- wie die Südflanke der Sahara stärker überregnet wurden; im Sahelgebiet schließt ROGNON auf eine ganzjährige Regenzeit mit häufigen Dauerregen anstelle der kurzen Sommer-Regenzeit mit ihren heftigen Schauern. Das ist nicht verträglich mit der Lehrbuch-Vorstellung von einer meridionalen Verschiebung aller Klimagürtel, die im Süden und Norden der Sahara alternierende Feuchtphasen auslösen müßte. Nur im Winterregengebiet nördlich 36°N finden wir in Anatolien und Iran (so am Van-See) eine markante Trockenperiode gleichzeitig mit der Feuchtphase der ganzen Sahara. Diese Feuchtphase, schon einmal um 7500 v. h. unterbrochen, wurde ab 5500 v. h. durch eine allmähliche Austrocknung abgelöst, die um 4000 v. h. in der Sahara, etwas später auch in Rajasthan zu einem ariden Klima ähnlich wie heute führte. Diese Austrocknung haben die früheren Hochkulturen miterlebt: das Alte Reich Ägyptens, die Stadtkulturen zwischen Jericho und Ur, die Indus-Kultur; ihre Krisen, oder ihr Untergang hängen offenbar von diesen Klimaänderungen stärker ab als von dem Einfall fremder Volksstämme.

Die Interpretation dieser Befunde aus dem *Holozän* (=Neolithikum) erfordert eine genaue Synchronisation des Ablaufs der Klimageschichte in weit entfernten Räumen, sowie ein meteorologisches Verständnis dieser räumlichen Beziehungen anhand rezenter Befunde. Zunächst ergibt sich auch heute in den Übergangsjahreszeiten wie im Winter die Existenz quasi-permanenter Höhenträge, die sich in 150–300 mbar jeweils weit zurück nach SW bis in die inneren Tropen hinein erstrecken (FLOHN 1975). Ähnlich existieren diese „*diagonalen Höhenträge*“ auch über der Südhalbkugel, wo sie bis zum Äquator, gelegentlich auch darüber hinaus reichen. In ihrem Bereich kommt es zu einer Wechselwirkung der tropischen und außertropischen Störungen (Abb. 9), die zu kräftigen Wirbeln mit Gewitterschauern und Sandstürmen führen: dies sind die schon um

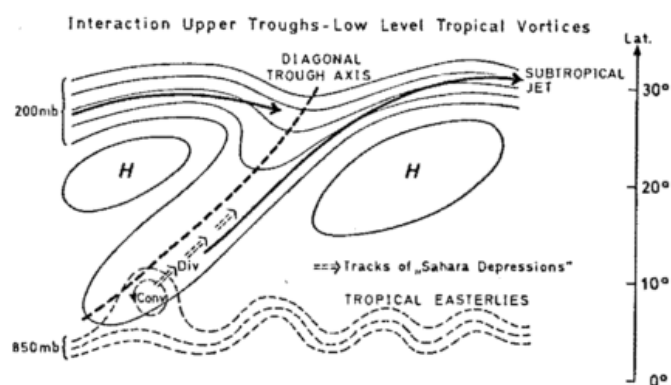


Abb. 9: Diagonale Höhenträge (200 mb) und ihre Wechselwirkung mit Störungen der tropischen Ostströmung (700 mb)

1935 bekannten „Saharadepressionen“. Im westlichen und zentralen Nordafrika läßt sich an heutigen Statistiken die simultane Schrumpfung bzw. Ausweitung des Trockengürtels und die Rolle der Frühjahrsregen hierbei nachweisen; dasselbe ergab sich aus historischen Studien der Regenverhältnisse im 17.–19. Jahrhundert (NICHOLSON).

Während der ersten Feuchtphase 10500 – 8000 v. h. existierten noch ausgedehnte Eisflächen in Nordeuropa und Nordamerika. Das ganze Jahr über reichte die globale Kaltluft und die von ihr ausgehenden Kältetröge weiter südwärts als heute, während sich über den Tropen bereits die heutige Zirkulation herstellte. Die Befunde deuten im Atlantik wie im Pazifik auf eine Abschwächung der subtropischen Hochdruckgebiete und damit der Intensität der Passatwinde. Dies führt notwendig zu einer Abschwächung des Aufquellens von Kaltwasser sowohl an den Westküsten (NW-Afrika, Kalifornien) wie am Äquator, hier also zur Vorherrschaft der El-Niño-Zirkulation mit Warmwasser, starker Verdunstung und äquatorialen Regen auf dem Meer: die geophysikalische Rolle dieses Wechsels ist kaum zu überschätzen. Um 8000 – 7300 v. h. kam es, nach Verschwinden des skandinavischen Eises, zu einer Unterbrechung der Feuchtphase. Diese stellte sich jedoch wieder her, solange noch über Labrador – Baffinland ausgedehnte Eisfelder auch im Sommer tiefe, weit ausgreifende Höhenträge zur Folge hatten: diese traten offenbar in Nordamerika sowie in Europa/Afrika in den Übergangszeiten häufiger auf als heute. 5–10 Fälle dieser Art pro Jahr genügen, um insgesamt 150–250 mm zusätzlichen Niederschlag hervorzubringen. Die endgültige Austrocknung vollzog sich erst um etwa 4500 v. h., mit dem Verschwinden der Eisreste aus Labrador.

Die für den Klimaablauf entscheidenden *physikalischen Randbedingungen* in der Subpolarzone waren also um 6000 v. h. noch wesentlich *anders* als heute; erst um 4500 v. h. entwickelten sie sich, offenbar mit einer noch stärkeren Reduktion des arktischen Eises. Die ebenfalls noch warme Phase um 4000 v. h., deren regionale Einzelheiten weniger gut bekannt sind, war im Trockengürtel der Alten Welt, wie im SW Nordamerikas, in Südafrika und in Australien ähnlich trocken wie heute. Noch eine weitere Randbedingung sollte nicht vergessen werden: die bereits erwähnte (Abschn. 4.3) Vegetationszerstörung und Desertifikation, die mit der Zunahme der Oberflächenalbedo über den Mechanismus des Charney-Modells zu einer Verstärkung des Absinkens führt. Sie wird wahrscheinlich bei einem Rückgang des Arktis-Eises eine Zunahme der Niederschläge im Sahel hinauszögern, jedenfalls solange, bis durch geeignete Schutzmaßnahmen eine geschlossene Grasland-Vegetation in den Randgebieten der Sahara wieder hergestellt werden kann. Das aber ist ein ökonomisch-soziales Problem.

6.3 Letztes Interglazial: Eem-Warmzeit 120 000 v. h.

Die Entwicklung quantitativer Arbeitsmethoden in der Geologie hat in den letzten Jahren einige aufregende Entdeckungen innerhalb der Erdgeschichte ermöglicht. Hierzu zählt die Entdeckung eines 17–18maligen Wechsels zwischen Eiszeit und Warmzeit (Interglazial) in den letzten 2 Millionen Jahren, in zeitlicher Übereinstimmung datiert mittels der Umkehrung des erdmagnetischen Feldes, gefunden in Ozeanbohrkernen aus dem äquatorialen Pazifik (SHACKLETON – OPDYKE) und in Lößprofilen in Mähren und Niederösterreich (KUKLA und FINK). Damit ergab sich eine gesicherte Chronologie der Kalt- und Warmzeiten für die paläomagnetische Brunhes-Epoche der letzten 700 000 Jahre. In allen geeigneten Ozean-Bohrkernen findet man in der Zeit zwischen 127 000 und 75 000 v. h. (mit einer Fehlergrenze unterhalb $\pm 5 000$ Jahren) drei

Warmphasen mit zwei kurzen Kaltphasen dazwischen; genauere Untersuchung in Barbados, auf Mallorca, Neuguinea und an der Themsemündung belegen auch die zugehörigen "eustatischen" Schwankungen des Meeresspiegels, da in den Kaltphasen große Wassermengen als kontinentales Eis gespeichert werden. Auf dem Festland sind bisher zwei nahezu vollständige Moorbohrkerne untersucht worden (in Mazedonien und südlich der Vogesen), die die gleichen Schwankungen zeigen, aber in wesentlich höherer zeitlicher Auflösung. Noch weiter auflösbar sind die Diatomeenablagerungen Nordwestdeutschlands mit ihren über 10 000 Jahre reichenden Jahresschichten (H. MÜLLER), die eine pollenanalytische Analyse von Abschnitten von nur 15 Jahre Länge erlauben.

Nach allen vorliegenden Befunden ist die früheste der drei Warmphasen mit deutlichem Abstand die wärmste, noch etwas wärmer als die erörterte holozäne Warmphase, offenbar auch wärmer als die vorhergegangenen Interglaziale. Sie reichte von 127 000 bis etwa 115 000 vh; die wärmste Phase umfaßte in den Vogesen mindestens 10 000 Jahre, dagegen die beiden Kaltphasen nur jeweils 1600 bzw. 1000 Jahre. Für Europa und die Sowjetunion existiert eine detaillierte Vegetationsanalyse (FRENZEL) dieser Warmzeit, die mit dem holländischen Lokalnamen Eem (im engeren Sinne) bezeichnet wird; nach dieser Analyse müssen die Temperaturen 2–3°C höher gelegen haben als heute, in Sibirien sogar bis 6°C. Ähnlich wie im Holozän müssen die Niederschläge höher gewesen sein, zumal die höhere Temperatur schon an sich zu einer Zunahme der Ozean-Verdunstung führt. Neben der oben erörterten Dominanz der El-Niño-Zirkulation am Äquator ist eine weitere Ursache der Verstärkung des hydrologischen Zyklus der eustatische Meeresspiegelanstieg auf + 5–7 m, der durch einen breiten Meeresarm zwischen Ostsee und Weißem Meer Fennoskandien zur Insel macht und im Mündungsgebiet von Ob und Jenissei bis über 1000 km weit ins Binnenland eingreift (FRENZEL). Zugleich kam es zu einem drastischen Rückzug des Dauerfrostbodens in Ostsibirien bis etwa 57° Breite (heute etwa 49°). Auch bei einem Anstieg der Temperaturen um 6°C erlebte Sibirien auch damals sehr kalte Winter; doch müssen im Sommer die Küsten weitgehend eisfrei gewesen sein. Andererseits ergeben die Bohrkerne im Arktischen Ozean, daß der zentrale Kern des arktischen Eises zwischen Grönland, Alaska und Ostsibirien alle Warmzeiten seit mindestens 700 000 Jahren ohne Unterbrechung überdauert hat; die gleiche Annahme erscheint für das Grönlandeis immerhin wahrscheinlich (wenn auch nicht belegt).

Mit dem stärker maritimen Klima Europas reichten wärmeliebende Wälder weit nach Rußland hinein. Das Vorkommen von Löwen, Flußpferden und Waldelefanten in Großbritannien ist ein besonders auffallendes Anzeichen wärmerer Bedingungen, wenn auch der Schluß auf tropisches Klima nach Ausweis der Vegetation sicher ungerechtfertigt wäre. Aus den tropischen Kontinenten liegen bisher nur wenige Befunde vor — eine lange humide Phase an der westafrikanischen Küste und in der Afar-Senke am Roten Meer entsprechen den Befunden der holozänen Warmzeit.

Diese Eem-Warmzeit war offenbar die wärmste Phase seit Beginn der Brunhes-Epoche vor 700 000 Jahren, aber das gesamte letzte Interglazial dauerte wesentlich länger;

es umfaßte zwei weitere, etwas kühlere Warmphasen, getrennt durch zwei intensive Kaltphasen um etwa 110 000 und 90 000 vh. Die zugehörigen Schwankungen des Meeresspiegels zwischen –70 und –80 m in den Kaltphasen (letzte Eiszeit –100 m) und etwa –5 m in den beiden späteren Warmphasen zeigen, daß die Schwankung des globalen Eisvolumens immerhin 70–75% derjenigen zwischen letzter Eiszeit und heute betrug. Diese Änderungen der Massenbilanz in den beiden Kaltphasen drängten sich jeweils auf weniger als 10 000 Jahre zusammen; die entsprechenden Klimaänderungen auf dem Festland liefen nach Ausweis der (verzögerten) Vegetationsschwankungen in den europäischen Mooren in wenigen 100 Jahren, in Wirklichkeit also vermutlich in < 100 Jahren ab. Das wird bestätigt durch den "Grönland-Blitz", eine in ihrem Mechanismus noch nicht einwandfrei geklärte Abkühlung in "weniger als 100 Jahren" (DANSGAARD), die im Eis Nord-Grönlands in über 1300 m Tiefe seit mindestens 90 000 Jahren tiefgefroren aufbewahrt ist.

Gewiß sind noch nicht alle Fragen geklärt. Offenbar haben sich im mittleren Europa die beiden Kaltphasen, trotz globalen Charakters, nur kurzfristig in Form *abrupter Abkühlungen* in der und hier allein interessierenden, "humanen" Zeitskala ausgewirkt. Ähnliche Ereignisse haben sich nach den heute vorliegenden Befunden in allen jüngeren Interglazialzeiten (und im Holozän) abgespielt — auf dieses Problem muß noch (Abschn. 8) eingegangen werden.

Der eustatische Meeresspiegelanstieg im Eem ist in seiner Ursache noch nicht geklärt — ein Anstieg um 5–7 m entspricht entweder dem Abrutschen des Eises der Westantarktis oder dem Verschwinden des Grönlandeises, oder einem entsprechenden Wasserverlust der sehr stabilen Ostantarktis. Während das zuerst genannte Ereignis u.U. recht rasch vor sich gehen könnte (genauere Vorstellungen über die Zeitskala liegen allerdings nicht vor), laufen die beiden anderen Ereignisse so langsam ab, daß der zugehörige weltweite Meeresspiegelanstieg in der Größenordnung weniger mm pro Jahr (heute 1,1 mm) bleibt.

6.4 Eisfreie Arktis, vereiste Antarktis (12–2.5 Mill vh)

Während die bisher dargestellten Klimaphasen keine grundsätzlichen Abweichungen gegenüber dem heutigen Klimabild zeigen, trifft dies für den extremsten Fall eines völligen Verschwindens der arktischen Treibeisdecke nicht zu. Die Idee eines Verschwindens des arktischen Treibeises hat zuerst BUDYKO um 1962 entwickelt, und zwar als Endergebnis einer *gezielten Umwandlung des Klimas*, wie sie 1959 auf einem der Kongresse der KPdSU proklamiert worden war — im Einklang mit der marxistischen These von der Umwandlung der Natur durch den Menschen. Bei näheren Untersuchungen stellte sich heraus, daß dieses Projekt (schon wegen der Ausdehnung der Eisdecke über $10 \cdot 10^6 \text{ km}^2$) nicht nur extrem aufwendig war, sondern auch sehr weitreichende Nebenwirkungen zur Folge haben konnte. Später erkannte man, daß die im Gange befindliche Zunahme des CO₂-Gehaltes zu dem gleichen Ergebnis führen könnte. Die Sensitivität dieses Systems wurde bereits besprochen (vergl. Abschn. 2.1); ein vereinfachtes, eindimensionales Klimamodell (BUDYKO 1969) ergab bei wachsendem CO₂-Gehalt und zunehmender Erwärmung ein immer rascheres Rückweichen der Eis/Schneegrenze zum Nordpol hin.

Ein solches, scheinbar jeder Erfahrung widersprechendes Modell konnte nicht ohne Widerspruch hingenommen werden. Schon die Frage, ob unter den heutigen Klimabedingungen die Eisdecke irreversibel verschwinden kann, oder ob sie sich im nächsten Winter neu bildet, mußte eingehend erörtert werden – wir können sie offen lassen, da nunmehr ein Verschwinden des Treibeises unter extremen, von den heutigen abweichenden Klimabedingungen zur Erörterung steht. Diese Frage kann nur mit umfangreichen Modellrechnungen beantwortet werden: unter welchen Bedingungen ist das dynamische System Meer – Treibeis (mit Polynyas) – Schneedecke – Atmosphäre über den jahreszeitlichen Wechsel der Strahlungsbilanz hin stabil bzw. instabil? Solche Rechnungen sind im Gang; eine ganze Familie von stufenweise immer komplexerer Modelle muß unter verschiedenen Randbedingungen getestet werden, eine umfangreiche Arbeit, die nicht heute oder morgen zu Ende geführt werden kann.

Einer der vielen Einwände war die Frage, ob ein eisfreier Arktischer Ozean gleichzeitig mit einer vereisten Antarktis existieren könne; dies ergibt eine schwer vorstellbare *Asymmetrie* der beiden Halbkugeln. Aber auch heute existiert eine deutliche Asymmetrie: die Troposphäre über der Antarktis ist im gleichen Niveau im Jahresmittel 11–12°C kälter als über der Arktis, im Nordsummer/Südwinter sogar um über 26°C. Da nach einfachen Überlegungen – die durch die Modellversuche von FULTZ (1959) bestätigt wurden – die Zirkulation der Atmosphäre von dem Temperaturgefälle zwischen Äquator und Pol abhängt (KORFF und FLOHN 1969), ist die Zirkulation auf der Südhemisphäre stärker als auf der Nordhalbkugel und greift über den Äquator hinüber: im Jahresdurchschnitt bis etwa 6° Nordbreite, im Juli (Januar) auf rund 12° N (1° S). Das zirkulationserzeugende meridionale Temperaturgefälle ist heute über der Südhalbkugel im Jahresdurchschnitt 42% größer als über der Nordhalbkugel.

Tatsächlich hat aber – das ist eine der grundlegenden Erkenntnisse, die wir dem Deep Sea Drilling Programm mit der "Glomar Challenger" verdanken – ein derart krasser Gegensatz der beiden Pole im jüngeren Tertiär viele Millionen Jahre lang existiert (KENNETT 1977). Der Antarktische Kontinent war erstmals vor 38 Ma (= 10⁶ Jahre) mindestens teilweise vereist; schon damals bildete sich das antarktische Bodenwasser der Ozeane mit einer Abkühlung um etwa 5°C. Eine vollständige *Vereisung der Antarktis* besteht seit dem mittleren Miozän vor 12–14 Ma; sie war seither nur noch sekundären Schwankungen unterworfen. Vor etwa 5,5 Ma bildete sich dieses zunächst noch relativ flache Eis mit Temperaturen um 0°C in ein "kaltes", stabiles Eis (der Ostantarktis) um, noch 200–300 m mächtiger als heute, begleitet von einer globalen Abkühlung und einer eustatischen Absenkung des Meeresspiegels. Diese führte an der Schwelle von Gibraltar zu einer (mehrfach wiederholten) Abschnürung und Austrocknung des westlichen Mittelmeeres (HSÜ), auf deren regionale klimatische Bedeutung nicht weiter eingegangen werden kann.

Die allmähliche Abkühlung während des mittleren und jüngeren Tertiärs hängt offenbar mit der Bildung des kalten, von der Antarktis sich ausbreitenden Bodenwassers zusammen; durch Mischung sanken auch in mittleren Schichten die Wassertemperaturen langsam ab, und mit der Ver-

stärkung der atmosphärisch-ozeanischen Zirkulation kam es zum Aufquellen dieser kühlen Schichten am Äquator und an den subtropischen Westküsten. Eine Vereisung der Gebirge der Nordhalbkugel trat erst lange nach der Antarktis ein, in Alaska vor etwa 9 Ma, in Island und im kalifornischen Hochgebirge vor etwa 2,8 Ma. Eine Bildung von arktischem Treibeis war erst möglich, nachdem diese kontinentalen Gletscher allmählich beim sommerlichen Schmelzen eine dünne salzarme Deckschicht des Arktischen Ozeans gebildet hatten; dies geschah offenbar erstmals vor 2,3 Ma, zuerst sicher noch als jahreszeitliches Eis.

Damit steht also fest, daß in der Zeit zwischen 12 und 2,5 Ma gleichzeitig ein vollständig vereister antarktischer Kontinent und ein offener, eisfreier arktischer Ozean existierten. In dieser Zeit müßte (aus theoretischen Gründen) der meteorologische Äquator im Jahresmittel in etwa 9–10° Nordbreite gelegen haben; dafür gibt es in Afrika auch Belege. Als weitere Folge wäre eine Verlagerung des Trockengürtels bis 40–50° N zu erwarten, die im östlichen Europa auch belegt ist (z.B. im Wiener Becken, s. Abb. 10); die subtropische Flora jener Zeit ist vielfach beschrieben worden (SCHWARZBACH, MÄGDEFRAU).

Northern Boundary of NHem Evaporite Zone



—	Quaternary	(0-2 Ma)
- - -	Late Tertiary	(5-15 Ma)
.....	Early Tertiary	(30-50 Ma)

Abb. 10: Mittlere Nordgrenze des Trockengürtels (Ablagerungen von Salz, Gips usw.) im Quartär (0 – 2 Ma), Jungtertiär (5 – 15 Ma) und Alttertiär (30 – 50 Ma) nach LOTZE

und Wälder der gemäßigten Zone reichten bis Nordgrönland. Nach SCHWARZBACH lagen im rheinischen Braunkohlengebiet die Temperaturen in allen Jahreszeiten um 5–8°C höher als heute. Der südhemisphärische Trockengürtel reichte bis in die Nähe des Äquators. Es ist unmöglich, in diesem Rahmen auf Einzelheiten einzugehen, zumal hierzu eine vollständige Auswertung der neueren geologischen Literatur notwendig ist.

Nach BUDYKOs Modell kann der Übergang zu einem solchen Klima – d.h. das Verschwinden des arktischen Eises – bei einer allgemeinen Erwärmung um ca. 4°C eintreten (vgl. auch KELLOGG). Das entspräche (je nach Modellannahme) einem "virtuellen" CO₂-Gehalt von 800 – 1100 ppm; der reale CO₂-Wert liegt bei 750 ppm (± 15%) (Abschn. 4.2). Ob und wann solche Werte erreicht werden, hängt von Entscheidungen auf energiepolitisch-ökonomisch-sozialem Gebiet ab (Abschn. 8).

7 Kaltphasen in der Klimageschichte

7.1 Kleine Eiszeit (1550–1850)

Daß das Klima im 20. Jahrhundert nicht das einzig mögliche ist, ja daß es selbst im Rahmen der letzten 500 Jahre ausgesprochen anormal ist, gehört zu den Tatsachen, die selbst den meisten Meteorologen unbekannt sind. Tatsächlich haben wir in Europa – wie das am besten bekannte Verhalten der Alpengletscher zeigt – seit rund 10 000 Jahren immer wieder einen *Wechsel zwischen Warmphasen* (wie in Abschn. 6.1 geschildert) und *Kaltphasen* erlebt. Hierbei sind die Phasen innerhalb der beiden Gruppen untereinander recht ähnlich, ihre Dauer aber variabel; irgendwelche persistenten Perioden existieren offenbar nicht, oder ihr Anteil an der gesamten Varianz ist vernachlässigbar gering. Während die Gletscherstände der Zeit 1930–60 offenbar nahezu identisch sind mit denen früherer Warmphasen (diese Aussage ist etwas unsicher), liegen die Moränen der Gletschervorstöße um 1820 und um 1855 fast genau auf denen früherer Gletscherhochstände (PATZELT). Die letzte Kaltphase kann uns also als Modell für alle früheren seit dem Rückzug der großen Inlandeise dienen; ihre Bezeichnung als "Kleine Eiszeit" ist allerdings bewußt übertrieben. Ihr Beginn ist nicht eindeutig festlegbar: schon um 1160, um 1320 und um 1430 kam es zu kürzeren, aber markanten Gletschervorstößen in den Alpen, und für die beiden letztgenannten Termine liegen viele Nachrichten über ganz ungewöhnliche Klimaanomalien vor (LAMB, von RUDLOFF). Von längerer Dauer war die Klimaverschlechterung ab 1560, die in Zürich einen Rückgang der Wintertemperaturen um 2°C brachte, während bei Kopenhagen das ganze Jahr über Winde aus Südost und Ost – als Anzeichen blockierender Antizyklonen vorherrschten. Die Witterungsabläufe ähneln sehr denen, die wir heute in Einzeljahren mit strengen Wintern (1939–42, 1946/7, 1962/3) erleben: häufig blockierende Antizyklonen, Wetterlagen mit anhaltend starker meridionaler Komponente – ungewöhnlich kalt, aber auch ungewöhnlich warm, häufige Dürre- und Nässeperioden, schneereiche und bis tief in das Frühjahr anhaltende Winter mit nachfolgenden Mißernten.

Für die Beurteilung der Klimabedingungen jener Zeit sind nicht nur die Gletscher der Hochgebirge, sondern vor allem die Länder nahe der Polargrenze des besiedelten Landes wesentlich: Island, Schottland, die Faröer und Skandinavien. Die Nachrichten vom Verhalten des *arktischen Treibeises* – mit seiner *entscheidenden Rolle für Albedo und Wärmehaushalt* – häufen sich jetzt: Island viele Jahre hindurch 6–9 Monate lang von Treibeis blockiert, massive Eisvorstöße nach den Faröern (mit Wassertemperaturen 3–4°C unter den heutigen) und selbst nach Norwegen (wo die Fischerei jahrelang fast ohne Ertrag blieb), Rückgang der Vegetationsgrenzen und schwere Nahrungskrisen in Schottland. Besonders eindrucksvolle Beispiele aus der Zeit 1755–1790 schildert die durch genaue meteorologische und landwirtschaftliche Daten ausgezeichnete Arbeit von PFISTER aus dem Kanton Bern; auf die weltweite Zusammenschau von H. LAMB (Vol. II) sei nochmals hingewiesen.

Eine vorläufige Zusammenstellung der jährlichen Getreidepreise in der Zeit von 1500–1860 gibt Abbildung 6, die aus den fast vollständigen Reihen von 5 deutschen Städten

gemittelt wurde; von einem langjährigen Trend abgesehen, zeigt sie zahlreiche, meist gruppenweise auftretenden Jahre mit Preisanstiegen um das drei- bis sechsfache. Das absolute Maximum (bis 1950!) waren die weltweiten Hungerjahre 1816/17 nach dem Vulkanausbruch des Tambora 1815.

Im Gebiet der mediterranen Winterregen existieren widerspruchsvolle Nachrichten: einmal stimmen die kältesten Abschnitte (genannt seien die Zeiten um 1570, 1630, vor allem 1680–1700, nach 1770, 1816 f, 1845 f) mit Feuchttjahren überein, einmal mit Dürren. Das gilt für Algerien, die Seen Mittelitaliens ebenso wie für das Tote Meer und das Kaspische Meer, aber auch (nach Sh. NICHOLSON) für die Sahelzone. Systematische Studien über die Telekonnectionen der Niederschläge im Mittelmeergebiet bringen die Lösung (HELBIG): die Maxima der mediterranen Winterregen konzentrieren sich im Bereich quasistationärer Höhentöpfe, und negative Korrelationen gleichzeitiger Werte mit Abständen von 700–1000 km (= halbe Rossby-Wellenlänge) sind häufig. Daher ist es hier sinnvoll, eine ganze Klimazone zusammenzufassen: die Abhängigkeit der Klima-Anomalien von der Länge ist mindestens ebenso groß wie die von der Breite. Die regionale Verteilung der entgegengesetzten Witterungsanomalien wird beherrscht von der jeweils quasistationären Lage des blockierenden Hochzentrums und der begleitenden Höhentöpfe bzw. Kaltlufttropfen – das kennt jeder erfahrene Synoptiker, und das ist auch das zentrale Problem jeder langfristigen Vorhersage. Auch in Nordamerika hängen die kalten Zeitabschnitte dieser Periode mit blockierenden Antizyklonen zusammen, wie die Auswertung von Baumringen (FRITTS) gezeigt haben.

Was ist nun die Ursache des Vorherrschens meridionaler Zirkulationstypen in dieser Klimaphase, was die Ursache dominierender zonaler Zirkulationstypen mit polwärts verschobenen subtropischen Hochzellen in den Warmphasen? Beim Vergleich etwa der Abschnitte 1815–1855 (nochmals um 1890) und 1930–1960 fällt sofort die verschiedene Lage der arktischen Treibeisgrenze im Atlantik auf; im Raume um Island-Norwegen handelt es sich um Verschiebungen von der Größenordnung 1500 km. Was aber verursachte diese Ausweitung des arktischen Treibeises, die maximal 2 Mill. km² erreicht haben dürfte?

Auf diese Frage existieren z.Z. zwei Antworten, von denen wenigstens eine geophysikalisch einwandfrei begründet ist. Sie bezieht sich auf eine von LAMB zusammengefaßte Statistik von Vulkanausbrüchen (s. Abschn. 3.2), bei der in der Tat ein Zusammenhang zwischen den Höhepunkten der kleinen Eiszeit und besonders schweren Vulkaneruptionen (oder Gruppen) auffällt. Andererseits hat EDDY darauf hingewiesen, daß die auffällige lange Periode geringster Sonnenaktivität der Zeit 1643–1710 mit ihrem Maximalstadium übereinstimmt – dieser Zusammenhang ist jedoch bisher physikalisch noch ganz ungeklärt und muß daher offen bleiben. Wegen der "Unvorhersagbarkeit" beider Ursachen kann das erneute Auftreten einer solchen Kaltphase in den nächsten 50–100 Jahren weder bejaht noch ausgeschlossen werden – auch eine statistische Aussage über die Wahrscheinlichkeit bleibt unsicher, da zahlenmäßige Unterlagen in beiden Fällen nur wenige Jahrhunderte umfassen und subjektive Beurteilungen nicht ausschließen können. Sofern sich aber die globale Erwärmung

(etwa ab 2000) durchsetzt, werden Wahrscheinlichkeit und Ausmaß einer Wiederholung der Kaltphase ständig zurückgehen.

7.2 Übergang zu einer Eiszeit?

Keine Frage wird dem Klimatologen öfter von Reportern gestellt, als die nach der nächsten Eiszeit. Umso merkwürdiger ist die geringe Rolle, die der mögliche Übergang vom heutigen (interglazialen) zu einem glazialen Klima in der wissenschaftlichen Literatur spielt. Das mag zwei Gründe haben: Geologen und andere an der Klimageschichte interessierte Wissenschaftler wagen sich nicht (mit einigem Recht) auf ein ihnen fremdes Feld, und die meisten Meteorologen halten dieses Problem für ebenso unwissenschaftlich wie das der Sintflut. Diese Einstellung ist aber heute nicht mehr gerechtfertigt, nachdem in einer Reihe von Fällen einwandfrei *abrupte Klimaänderungen* mit einer – in "humanen" Maßstäben – *ganz kurzen Zeitskala* nachgewiesen wurden, die sämtlich aus den Interglazialen oder den – hier nicht interessierenden – Übergangsstadien zwischen Glazial und Interglazial stammen. Einwandfreie Belege beruhen entweder auf Untersuchungen an fossilen Mooren mit Jahresschichten (Varven), an Seen mit hoher Sedimentationsrate oder von Baumringen. Aus Raumgründen ist es nicht möglich auf einzelne Befunde einzugehen (FLOHN 1974, 1978). Einer der besten stammt aus der Lüneburger Heide (H. MÜLLER 1974, 1978), wo vor über 300 000 Jahren ein Wald, der einem etwas wärmeren Klima als heute entsprach, binnen 30 Jahren (!) verschwand, um nach einer Pause – die Zeit reicht nicht aus, um eine arktische Tundra hervorzubringen – durch subarktischen Birkenwald ersetzt zu werden; darauf folgte in 300–400 Jahren eine Sequenz von Waldtypen, wie man sie heute auf einer Bahnfahrt von Narvik (68° N) nach Südschweden sehen kann. Dauert die Reaktion eines Waldes auf eine Klimaänderung sicher Jahrzehnte oder Jahrhunderte, so gibt es schnellere Indikatoren: In Mittelengland wurde nach Ende der letzten Eiszeit eine subarktische Käferfauna in etwa 50 Jahren durch eine warm-gemäßigte Fauna ersetzt, äquivalent einer Erhöhung der Juli-Temperatur um 8–9°C (COOPE 1977).

Das sind nur zwei nüchterne Befunde, gewonnen mit neuzeitlichen Arbeitsmethoden, die in ihrer Gesamtheit nicht mehr anzweifelbar sind: die wenigen Klimahistoriker meteorologischer Herkunft haben sich inzwischen von der Bedeutung dieser Zeitskala abrupter Klimaänderungen (< 100 Jahre) überzeugen lassen. Mögliche Ursachen für die (häufigeren) rapiden Abkühlungen sind schon in den Abschnitten 2 und 7 erörtert worden; für Erwärmungen stehen sie noch aus. In jüngster Zeit ist auch klar geworden, daß solche Ereignisse sich nicht notwendig synchron auswirken, sondern – wegen der nur allmählichen Verlagerung barokliner Frontalzonen im Ozean oder dem regional verschieden raschen Ablauf der kontinentalen Vereisungen – *diachron*, d.h. mit erheblichen Zeitunterschieden in der Horizontalen. Das bedeutet auch eine Grenze für die Vorstellung eines "fast-intransitiven" Klimas im Sinne von E. LORENZ.

Nehmen wir die Möglichkeit einer abrupten Abkühlung dieser Zeitskala als gegeben an: wie und wo könnte sie sich abspielen? Zweifellos kann eine kontinentale Gletscherbildung nur mit einem *wiederholten Überdauern*

der Winterschneedecke über den Sommer hin beginnen; in den kritischen Gebieten der Subarktis – so die 750 000 km² große Baffin-Insel mit ihren Hochplateaus, Labrador, auch Lappland und die norwegischen Gebirge – schmilzt auch heute die meterdicke Schneedecke erst Anfang oder Mitte Juni endgültig ab, um sich Ende August oder im September neu zu bilden. Hierzu genügt in Baffinland ein Absinken der Sommertemperaturen um nur etwa 2°C, während in den anderen Gebieten 4–6°C notwendig wären, oder zugleich eine massive Zunahme der Schneeniederschläge. Die kritische Stellung Baffinlands erhellt auch daraus, daß in der kleinen Eiszeit – nach Ausweis von Flechten-Untersuchungen – die heute insgesamt 37 000 km² einnehmenden Plateau-Eisfelder sich auf 140 000 km² vergrößert hatten (IVES); entsprechende Untersuchungen in Fennoskandien stehen noch aus.

Eine Modelluntersuchung (ANDREWS – MAHAFFY) für Baffinland hat in zwei Experimenten gezeigt, wie sich eine um einen Faktor 3 erhöhte Schneebilanz in einer langsamen Zunahme von Fläche und Volumen einer Eisdecke auswirkt – langsamer als die Beobachtungen des eustatischen Sinkens des Meeresspiegels in den interglazialen Kaltphasen anzeigen. Aber in diesem Modell ist die machtvolle Rückkopplung zwischen Schneedecke, Albedo und Temperatur nicht voll und zu spät in Rechnung gestellt worden. Jedenfalls ist es höchst unwahrscheinlich, daß in den nächsten 100 Jahren, nachdem zuerst eine Kaltphase im obigen Sinne eintrat, dieser Prozeß sich über die unmittelbare Umgebung hinaus weltweit auswirken könnte. Hiergegen sprechen auch die langperiodischen Effekte der Erdbahnelemente, deren nächstes Minimum (kühle Sommer in der Arktis, kalte Winter zugleich in der Antarktis) erst in rund 10 000 Jahren fällig ist (BERGER).

Bei dieser Sachlage ist höchstens – bei einer Kombination mehrerer ungünstiger Voraussetzungen, etwa dem Zusammentreffen mehrerer sehr schwerer Vulkaneruptionen von der Intensität des Tambora (1815) oder wenigstens Krakatau (1883) innerhalb der jetzigen Phase relativ ausgedehnten polaren Treibeises, *vor* Wirksamwerden der erwarteten anthropogenen Erwärmung – mit einer "abortiven Vergletscherung" zu rechnen, die nicht zu einer vollen Eiszeit auswachsen würde. In unserer "humanen" Zeitskala wäre das aber schon schlimm genug: Serien von Jahren mit sehr kalten Wintern, kühlen und nassen Sommern, schwere Mißernten in weiten Teilen der gemäßigten Zone, zeitweise auch in den Tropen, die sicher nicht ausgeglichen werden können durch Feuchtejahre in Teilgebieten von Nordafrika und dem Nahen Osten. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist aber gering – sie beträgt nach verschiedenen Kriterien übereinstimmend zwischen 0,1 und 1 Prozent in den nächsten 100 Jahren. Außerdem wären für diesen Fall gezielte Gegenmaßnahmen denkbar, die hier nicht völlig utopischer Natur sind.

8 Wahrscheinlichkeit und Risiken: die Rolle der Energiepolitik

Die Wahrscheinlichkeit einer globalen Warmphase ist nach allem, was wir wissen, erheblich größer als die einer Kaltphase. Die Schwierigkeit bei der Abschätzung liegt darin, daß Entscheidungen und Entwicklungen auf politischer, sozialer und ökonomischer Ebene hier eingreifen können.

die vorherzusagen nicht nur dem Meteorologen schwer fällt. Wenn wir diese einmal versuchsweise vernachlässigen, dann dürfte in den nächsten 100 Jahren die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer *Kaltphase* vom Typ der kleinen Eiszeit nicht mehr als höchstens 20% betragen (und nach etwa 2000) weiter abnehmen). Für das Auftreten einer *Warmphase* im Sinne der Beispiele in den Abschnitten 6.1 und 6.2 müssen wir aber höhere Wahrscheinlichkeiten ansetzen, wenn auch erst nach der Jahrhundertwende; danach steigen sie – das ist die in vielen Diskussionen erworbene Überzeugung des Verfassers unter den hier und in Abschnitt 5 gegebenen Voraussetzungen – auf über 50% an.

Ist in diesem Falle aber eine Entwicklung zu einem eisfreien arktischen Ozean (Abschnitt 6.4) mit ihren fast unvorstellbaren Konsequenzen für Wasserversorgung und Ernährung noch vermeidbar? Damit überschreiten wir die Grenze des Fachwissens des Meteorologen, der sich nur allzu gerne in den akademischen Elfenbeinturm zurückziehen möchte. Aber die Dinge sind zu wichtig; eine Wende auf Grund politischer Entscheidung auf internationaler Ebene ist noch möglich, aber dann und nur dann, wenn das Dogma von der Notwendigkeit ständig zunehmenden wirtschaftlichen Wachstums – das bei begrenzten Vorräten (Ressourcen) mit den Naturgesetzen unvereinbar ist – zugunsten einer besseren Einsicht aufgegeben wird (GRUHL). Ebenso ist eine Stabilisierung des Bevölkerungswachstums notwendig – ohne einen höheren Lebensstandard in den Entwicklungsländern ist das unrealisierbar.

Gleichzeitig muß aber die *Energiepolitik* sich frei machen von der sinnlosen Verschwendung fossiler Energiequellen, die in 400 Ma durch biologische Prozesse aus der Sonnenenergie aufgebaut und gespeichert wurden (s. a. Beitrag JUNGE). Ein Übergang zu erneuerbaren Energiequellen (Sonne, Wind, Gezeiten – auch die kaum erschöpfbare Geothermik) ist möglich, erfordert aber eine Kombination neuartiger (und kostspieliger) Technologien, wie sie etwa am International Institut for Applied Systems Analysis in Laxenburg bei Wien von einer Arbeitsgruppe unter der Leitung von W. HÄFELE (früher Karlsruhe) entwickelt werden. Auch die Kernenergie muß in diesen Rahmen – jedenfalls für eine Übergangszeit – einbezogen werden. Das mit ihr verbundene Risiko ist auf jeden Fall geringer als das *Risiko einer Verlagerung aller Klimazonen*. Da ein Übergang zu neuen Technologien sicher über 30, wahrscheinlich 50 Jahre benötigt, drängt die Zeit. Neue Prioritäten müssen gesetzt werden. Es geht um das Wohl der nächsten Generationen . . .

Literaturauswahl

- ANDREWS, T.J.; MAHAFFY, M.A.W.
Quaternary Research 6 (1976) S. 167–183.
AUGUSTSSON, T.; RAMANATHAN, V.
J. atmos. Sci. 34 (1977) S. 448–451.
BERGER, A.L.
Quaternary Research 9 (1978) S. 139–167.
BJERKNES, J.
Monthly Weather Review 97 (1969) S. 163–172.
BROWN, L.R.
Worldwatch Papers, Washington D.C. 8 (1976).
BRYSON, R.A.; MURRAY, Th.J.
Climates of Hunger. Madison/Wis. 1977

- BUDD, W.F.
J. Glaciol. 14 (1975) S. 3–21.
BUDYKO, M.J.
Tellus 21 (1969) S. 611–619; 29 (1977) S. 193–204.
CESS, R.D.
J. atmos. Sci. 33 (1976) S. 1831–1843.
CHARNEY, J.G.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 101 (1975) S. 193–202
COOPE, G.R.
Philos. Transact. Roy. Soc. London 280 (1977) S. 313 – 340
DANSGAARD, W. et al.
Quaternary Research 2 (1972) S. 396–398.
DOBERITZ, R.
Ber. d. Deutschen Wetterd. 112 (1968).
EDDY, J.A.
Science 192 (1976) S. 1189–1202; 198 (1977) S. 824 – 829.
FINK, J.; KUKLA, G.J.
Quaternary Research 7 (1977) S. 363–371.
FLOHN, H.
Bonner Meteorol. Abhandl. 15 (1971); 21 (1975)
Quaternary Research 4 (1974) S. 385–404; in print (1978)
FRENZEL, B.
Die Klimaschwankungen des Eiszeitalters. Braunschweig 1967; Erdwiss.Forschungen I (1968).
FRITTS, H.C.
Tree Rings and Climate. London, New York 1976.
GABRIEL, B.
Berliner Geogr. Abh. 27 (1977).
GATES, W.L.
J. atmos. Sci. 33 (1976) S. 1844–1873.
GRUHL, H.
Ein Planet wird geplündert. Frankfurt a.M. 1978.
HÄFELE, W.; SASSIN, W.
Ann. Rev. Energy 2 (1977) S. 1–30.
HAHN, J.; JUNGE, Chr.
Z. f. Naturforsch. 32a (1977) S. 190–214.
HASSELMANN, K. u. Mitarb.
Tellus 28 (1976) S. 473–485; 29 (1977) S. 289–305, 385–392.
HAYS, J.D.; IMBRIE, J.; SHACKLETON, N.
Science 194 (1976) S. 1121–1132.
HELBIG, M.
Diplomarbeit Univ. Bonn (1976).
HSÜ, K. et al.
Nature 242 (1973) S. 240–244; 267 (1977) S. 399–403;
Naturwissensch. 61 (1974) S. 137–142.
HUGHES, T.
Rev. Geophys. and Space Phys. 13 (1975) S. 502–526;
15 (1977) S. 1–46.
HUMMEL, J.; RECK, R.A.
General Motors Res. Lab. Publ. 2607 (1978).
HUNT, B.G.
Monthly Weather Review 105 (1977) S. 247–260.
IVES, J.D. et al.
Naturwissensch. 62 (1975) S. 118–125.
KELLOGG, W.W.
WMO-Bull. 26 (1977) S. 229–240; 27 (1978) S. 3–10.
KENNETT, J.P.
J. geophys. Res. 82 (1977) S. 3843–3860.
KONDRATIEV, G. Ya.; NIKOLSKY, G.A.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 96 (1970) S. 509–522.

- KORFF, H.C.I.; FLOHN, H.
Ann. Meteorol. N.F. 4 (1969) S. 163–164.
- LAMB, H.H.
Climate — Present, Past and Future. Vol. I (1972); Vol. II (1977). London: Methuen.
- LORENZ, E.
J. appl. Meteorol. 9 (1970) S. 325–329.
- MÄGEDEFRAU, K.
Paläobiologie der Pflanzen. 4. Aufl. Stuttgart 1968.
- MANABE, S.; BRYAN, K.
Monthly Weather Review 97 (1969) S. 739–827;
J. phys. Oceanogr. 5 (1975) S. 3–29.
- MANABE, S.; WETHERALD, R.T.
J. atmos. Sci. 24 (1967) S. 241–259; 32 (1975) S. 3–15.
- MASON, B.J.
Promet 7 (1977) H. 4, S. 1–26.
- MASS, Cl.; SCHNEIDER, St.H.
J. atmos. Sci. 34 (1977) S. 1995–2004.
- MAYKUT, G.A.; UNTERSTEINER, N.
J. geophys. Res. 76 (1971) S. 1550–1575.
- MÜLLER, H.
Geologisches Jahrbuch 83 (1965) S. 327–352; A 21 (1974) S. 107–140; im Druck (1978).
- NAMIAS, J.
Short Period Climatic Variations 1934–1974. 2 Vol. Univ. of California 1975
- NEWELL, R. et al.
Pure and appl. Geophysics 116 (1978) S. 351–371.
- NICHOLSON, Sh.
Ph. D. Thesis Departm. Meteor. Univ. Wisconsin (1976)
- OLIVER, R.C.
J. appl. Meteorol. 15 (1976) S. 933–950.
- PACHUR, H.J.
Die Erde 106 (1975) S. 21–46.
- PATZELT, G.
Coll. Internat. C.N.R.S. No. 219 (1973) S. 51–59.
- PFISTER, Chr.
Beiheft 2, Jb. Geogr. Ges. Bern (1975).
- POLLOCK, J.P. et al.
J. geophys. Res. 81 (1976) S. 1071–1083.
- RODEWALD, M.
Dt. Hydrogr. Z. 20 (1967), S. 269; 25 (1972), S. 97–117.
- ROGNON, P.
Rev. Géogr. Phys. Géol. Dynam. 18 (1976) S. 251–282.
- ROWNTREE, P.R.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 98 (1972) S. 290–321.
- RUDLOFF, H.v.
Die Schwankungen und Pendelungen des Klimas in Europa . . . Braunschweig 1967.
- SCHWARZBACH, M.
Das Klima der Vorzeit. 3. Aufl., Stuttgart 1974.
- SHACKLETON, N.J.; OPDYKE, N.D.
Quaternary Research 3 (1973) S. 39–55.
- STRÜBING, K.
Der Seewart 35 (1974) S. 1–14, 36 (1975) S. 28–29.
- TREMPEL, U.
Diplomarbeit Univ. Bonn (1978).
- VOWINCKEL, E.; ORVIG, S.
World Survey of Climatology 14 (1970) S. 129–252.
- WANG, W.C. et al.
Science 194 (1976) S. 685–690.
- WETHERALD, R.T.; MANABE, S.
Monthly Weather Review 100 (1972) S. 42–59; J. atmos. Sci. 32 (1975) S. 2044–2059.
- YAMAMOTO, R.
J. Meteor. Soc. Japan 53 (1975) S. 482–486.

2

C. JUNGE, Mainz

Die CO₂-Zunahme und ihre mögliche Klimaauswirkung

Inhaltsübersicht

- 1 Einleitung
- 2 Das natürliche Kohlenstoff-Kreislaufsystem
 - 2.1 Die Kohlenstoffreservoirs
 - 2.2 Die CO₂-Kreisläufe und -Gleichgewichte
 - 2.3 Die Regelmechanismen des atmosphärischen CO₂-Spiegels
- 3 Die Störung des natürlichen Kohlenstoffkreislaufsystems durch den Menschen
 - 3.1 Der beobachtete CO₂-Anstieg in der Atmosphäre
 - 3.2 Die Ursachen des CO₂-Anstieges
 - 3.3 Die Bedeutung von Kohlenstoffisotopendaten für die Interpretation des CO₂-Anstieges
- 4 Die Abschätzung des zukünftigen CO₂-Anstieges bei unkontrolliertem wirtschaftlichem Wachstum
- 5 Die klimatischen Auswirkungen eines CO₂-Anstieges und mögliche Energiestrategien

1 Einleitung

Das im Titel angesprochene globale Klimaproblem ist in den letzten Jahren mehrfach in der wissenschaftlichen sowie in der informierenden Literatur, in Spezialarbeiten und zusammenfassenden Berichten behandelt worden. Wegen seiner allgemeinen Bedeutung ist die Diskussion weit über den Kreis der Fachwissenschaftler hinausgetragen worden. Dies ist zu begrüßen, sofern die Auseinandersetzungen objektiv geführt werden. Denn wenn die Ansicht der überwiegenden Zahl der Wissenschaftler zutreffen sollte, daß um die Mitte des nächsten Jahrhunderts, also in etwa 2 Generationen, eine merkliche globale Erhöhung der Oberflächentemperaturen auf unserer Erde infolge des Verbrauchs fossiler Brennstoffe zu erwarten wäre, sollten langfristige Planungen auf dem Energiesektor bald beginnen. Erfahrungen der Vergangenheit lassen nämlich erwarten, daß es immerhin mehrerer Jahrzehnte bedarf, ehe sich globale und grundsätzliche Umstellungen in der Energietechnologie durchsetzen.

Es wurde erst im Laufe der letzten Jahre ganz klar, wie komplex das Problem des Kohlenstoffkreislaufes wirklich ist. Auf zwei kürzlich abgehaltenen internationalen Arbeitstagungen (Dahlem und Ratzeburg, beide 1976) begann sich die Ansicht durchzusetzen, daß der bisher in der Atmosphäre beobachtete CO₂-Anstieg nicht allein dem Verbrauch fossiler Brennstoffe zuzuschreiben ist, sondern auch zusätzlicher CO₂-Erzeugung infolge Abholzens der Wälder und Schrumpfens der organischen Substanz in landwirtschaftlich genutzten Böden. Die zu klärenden Fragen haben sich damit in noch stärkerem Maße als bisher von den Disziplinen Meteorologie und Ozeanographie auf die der Biologie, der Forstwirtschaft und der Bodenkunde verlagert und stark interdisziplinären Charakter angenommen.

Der Gesamtkreislauf des Kohlenstoffs in der Natur ist außerordentlich komplex und läßt sich der Übersichtlichkeit halber in mehrere Teilkreisläufe aufgliedern. Wir wollen in unserer Diskussion *drei langsame* und *zwei schnelle Kreisläufe* unterscheiden. Aus diesem Grunde erscheint es auch zweckmäßig, insgesamt nicht von einem Kohlenstoffkreislauf, sondern von einem *Kohlenstoffkreislaufsystem* zu sprechen. Die Erläuterung dieses Kohlenstoffkreislaufsystems wird zwangsläufig einen breiten Raum in unserer Diskussion einnehmen.

Unser Thema umfaßt natürlich auch die zukünftige Entwicklung bis weit in das nächste Jahrhundert hinein. Damit werden in starkem Maße energiewirtschaftliche und bevölkerungspolitische Fragen einbezogen und der interdisziplinäre Charakter der Problemstellung abermals zwangsläufig ausgeweitet. Aus dieser Sicht läßt sich das Ganze auf *drei Fragestellungen* zurückführen:

- 1) Das quantitative Verstehen des natürlichen Kohlenstoffkreislaufsystems, einschließlich der Entwicklung geeigneter mathematischer Modelle für seine Darstellung und seine Störung durch den Menschen (Abschnitt 2 und 3).
- 2) Die Abschätzung der zukünftigen anthropogenen Gesamtproduktion von CO₂ als Funktion der Zeit unter der Abnahme unkontrollierten allgemeinen Wachstums. Dies umfaßt den Brennstoffverbrauch sowie die zukünftigen Veränderungen der Waldbestände und des organischen Materials in Böden. Bei Vorliegen dieser Schätzungen kann dann mittels (1) der bei unkontrolliertem Wachstum zu erwartende CO₂-Anstieg abgeschätzt werden (Abschnitt 4).
- 3) Die klimatische Auswirkung eines CO₂-Anstiegs, insbesondere in Bezug auf Temperatur und Niederschlag, global und regional (Abschnitt 5).

Die erste Fragestellung ist nur zu einem geringen Teil an die Meteorologie gerichtet. Die zweite Fragestellung liegt zu einem erheblichen Teil sogar außerhalb des Bereiches der eigentlichen Naturwissenschaften und ihre Beantwortung wird grundsätzlich mit Unsicherheiten belastet sein. Die dritte Fragestellung ist überwiegend an die Meteorologen gerichtet, jedoch unter Einbeziehung der Hydro- und Kryosphäre. Wir haben diese Gliederung unserem Beitrag zugrundegelegt.

An diese drei Fragestellungen schließt sich natürlich noch die sehr wichtige an, in welcher Weise sich die klimatischen Änderungen auf die verschiedenen menschlichen Tätigkei-

ten wie Landwirtschaft, Siedlung, Verkehr, etc. auswirken, und zwar vor allem regional. Die Beantwortung dieser Frage würde uns in den Stand versetzen, genauere Toleranzgrenzen für den CO₂-Anstieg festzulegen, aber wir können hier nur kurz darauf eingehen. Zum einen stellt sich diese Frage bei allen Klimaänderungen in ähnlicher Weise und sollte daher in einem weiteren Rahmen behandelt werden, zum anderen sind unsere Kenntnisse auf diesem Gebiet noch so lückenhaft, daß wir fast nichts sagen können. Trotzdem wird in Abschnitt 5 abschließend noch auf mögliche Energiestrategien eingegangen.

2 Das natürliche Kohlenstoffkreislaufsystem

Grundlage jeder Beurteilung über die Auswirkung menschlicher Tätigkeit auf die Umwelt ist das Verstehen der natürlichen Gegebenheiten. Das gilt auch für das CO₂-Problem. Wir beginnen deshalb unsere Diskussion mit der Darstellung des natürlichen Kreislaufsystems des Kohlenstoffs. Dieses System setzt sich zusammen aus Kreisläufen und chemischen Gleichgewichten, die noch keineswegs voll verstanden werden. Die Kreisläufe sind gekennzeichnet durch die verschiedenen Kohlenstoffreservoirs und die zwischen ihnen stattfindenden Flüsse. Unter ungestörten natürlichen Bedingungen wird dieses System als im Gleichgewicht oder im Quasi-Gleichgewicht befindlich angenommen. Für unser Problem wichtig ist weiterhin die Frage, auf welche Weise und wie schnell können Störungen im Gleichgewicht dieses Systems wieder ausgeglichen werden. Ausgangspunkt der Diskussion sind zweckmäßigerweise die Kohlenstoffreservoirs.

2.1 Die Kohlenstoffreservoirs

Dies sind Reservoirs meist einheitlicher chemischer Zusammensetzung, die sich mehr oder weniger gut voneinander abgrenzen lassen und für die Kreisläufe von Bedeutung sind. Tabelle 1 (S. 23) gibt eine Zusammenstellung für die anschließenden Erläuterungen.

Atmosphäre: Das heutige Mischungsverhältnis des CO₂ ist sehr angenähert $330 \cdot 10^{-6}$ Volumenanteile (= 330 part per million, ppm). Es lag im vorigen Jahrhundert vermutlich bei 290 ppm. Der Wert für die Reservoirgröße A in Tabelle 1 bezieht sich auf den heutigen Wert; er war im letzten Jahrhundert also um 10% kleiner.

Die mittlere Umwälzzeit des atmosphärischen CO₂ infolge der schnellen Kreisläufe liegt bei etwa 10 Jahren. Dies ist lang verglichen mit den atmosphärischen Mischungszeiten von ca. 1 Jahr, so daß die Atmosphäre für CO₂ ein recht gut durchmischtes Reservoir mit ziemlich einheitlichem Mischungsverhältnis darstellt. Sieht man von der Photodissoziation ab, untergeht das CO₂ in der Atmosphäre praktisch keinen chemischen Veränderungen. Wegen den gegenüber CO₂ vergleichsweise geringen Konzentrationen von CH₄, CO und einer Vielzahl von höheren Kohlenwasserstoffen spielen deren Kreisläufe für das CO₂ quantitativ keine Rolle.

Ozean: Im Ozean wurde bisher meist eine gut durchmischte Schicht von Oberflächenwasser von der Tiefsee unterschieden. Diese Schicht des Oberflächenwassers ist im Mittel etwa 100 Meter mächtig. Sie geht über eine ausgedehnte Übergangsschicht mit abfallender Temperatur in die Tiefsee über. Die Tiefsee als ein einheitliches Reservoir zu be-

von organischem Kohlenstoff beträgt etwa $0,1 \cdot 10^{15}$ gC/a und würde einem T von 7000 Jahren entsprechen. Durch den Einbau von organischem Kohlenstoff ins Sediment wird gleichzeitig eine äquivalente Menge an Sauerstoff der Atmosphäre zugeführt. Andererseits oxidiert der atmosphärische Sauerstoff eine entsprechende Menge des an der Erdoberfläche freigelegten sedimentären Kohlenstoffs wieder zu CO_2 zurück. Damit wird der Kreislauf sowohl bezüglich CO_2 als auch bezüglich Luftsauerstoff geschlossen. Es sei hier nur am Rande erwähnt, daß aus diesem Grunde viele Geochemiker diesen Kreislauf für die Kontrolle des Sauerstoffpegels in unserer Atmosphäre verantwortlich machen.

(3) *Der langsame Verwitterungskreislauf der Urgesteine:* Das atmosphärische CO_2 greift nicht nur die Karbonate der Sedimente, sondern auch die an der Erdoberfläche entstehenden Urgesteine an, ebenfalls unter Bildung von Bikarbonaten. Da das Kalzium und Magnesium in den Urgesteinen meist als Silikat vorliegen, benötigt dieser Verwitterungsprozeß die doppelte CO_2 -Menge wie in Gleichung (1). Bei der Sedimentbildung wird jedoch wiederum nur ein CO_2 -Molekül freigesetzt. Der dadurch bedingte Verlust an atmosphärischem CO_2 wird unter stationären Bedingungen durch den Vulkanismus nachgeliefert, mit einer geschätzten Flußstärke von $0,1 \cdot 10^{15}$ gC/a, entsprechend einem T von 7000 Jahren. Man vermutet, daß langfristig dieser Kreislauf innerhalb der Erdkruste dadurch geschlossen wird, daß entsprechende Teile der Sedimenthülle durch Plattentektonik in den Subduktionszonen in die Tiefe gelangen und zum Aufschmelzen kommen.

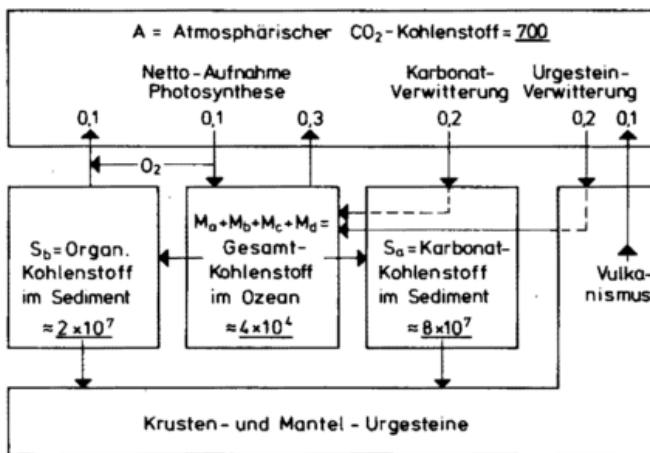
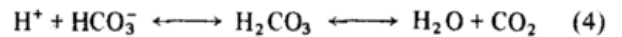
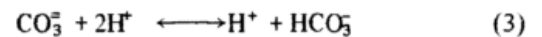
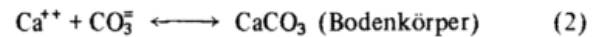


Abb. 1: Schematische Darstellung der drei langsamen geochemischen CO_2 -Kreisläufe. Die Zahlen in den Kästchen geben die Größe des Reservoirs in 10^{15} gC/a (Jahr) an. Die Angaben wurden aus der geochemischen Literatur zusammengestellt unter besonderer Berücksichtigung eines Buchmanuskripts von HOLLAND (1977).

In Abbildung 1 sind diese drei Kreisläufe bezüglich der Atmosphäre ausgeglichen mit einer Gesamtdurchflußstärke von $0,5 \cdot 10^{15}$ gC/a, entsprechend einem T von 1400 Jahren. Ob sich diese sehr langsam arbeitenden geochemischen Kreisläufe wirklich im stationären Gleichgewicht befinden, läßt sich zur Zeit nicht quantitativ nachweisen, sondern nur vermuten, da hinreichend genaue Daten nicht vorliegen.

Bei dem langsamen Verwitterungskreislauf der Urgesteine werden auch eine ganze Reihe anderer Verwitterungsprodukte gebildet, wie z.B. Kieselsäure, die schließlich ins Meer gelangen und dann unter anderem Anlaß zur Bildung von Tonmineralien geben. Man nimmt an, daß die damit verbundenen Prozesse für die chemische Zusammensetzung des Meerwassers, insbesondere für die Konzentration der Ca^{++} - und H^+ -Ionen bestimmend sind. Diese wiederum bestimmen im wesentlichen durch die chemischen Gleichgewichte



die Konzentrationen der Karbonat- und Bikarbonationen und schließlich auch den Partialdruck des CO_2 in der Luft. Nach diesem Konzept wäre der CO_2 -Pegel der Atmosphäre also geregelt durch chemische Gleichgewichte im Gefolge von Verwitterungsprozessen und nicht dynamisch durch die verschiedenen Kreisläufe, einschließlich der noch zu erläuternden schnellen Kreisläufe. Dies führt zu dem interessanten Ergebnis, daß der für das Leben auf der Erde so wichtige CO_2 -Spiegel sehr wahrscheinlich nicht durch die Lebensprozesse selbst festgelegt oder primär kontrolliert wird, wie es für andere Bestandteile der Atmosphäre der Fall ist. Allerdings steht in dieser Frage der letzte überzeugende Beweis noch aus, und es ist auch nicht unwahrscheinlich, daß dieses chemische Gleichgewicht durch den einen oder anderen Kreislauf modifiziert wird. Dies alles kann erst entschieden werden, wenn für das Gesamtsystem der Kohlenstoffkreisläufe und Gleichgewichte ein geschlossenes, quantitatives Modell vorliegt. Daß dies noch nicht der Fall ist, liegt an der Komplexität des Systems und an dem Mangel an wichtigen Daten.

Es steht jedoch außer Frage, daß diese langsamen Kreisläufe, wenn sie stärker gestört werden, in der Tat den atmosphärischen CO_2 -Spiegel beeinflussen können. Dies wird uns durch den jetzigen CO_2 -Anstieg sehr drastisch vor Augen geführt. Hier ist es der Mensch, der den langsamen Verwitterungskreislauf des sedimentären organischen Kohlenstoffs intensiv beeinflusst. Durch die Förderung der fossilen Brennstoffe und deren Verbrennung mit Luftsauerstoff wird der in Abbildung 1 mit $0,1 \cdot 10^{15}$ gC/a angegebene natürliche Rückstrom in die Atmosphäre auf etwa $5 \cdot 10^{15}$ gC/a, also um das 50-fache, gesteigert. Diese intensive Störung kann durch das ebenfalls langsam wirkende natürliche Regelsystem des atmosphärischen CO_2 -Pegels nicht aufgefangen werden, wie wir noch näher erläutern werden. Man könnte natürlich den philosophischen Standpunkt einnehmen, daß dies alles noch im Rahmen natürlicher Vorgänge erfolgt, da ja der Mensch letztlich ein Teil dieser Natur ist.

(4) Wir kommen nun zu den *schnellen Kreisläufen*, und zwar zunächst zum 4., dem *photosynthetischen Kohlenstoffkreislauf* (s. a. Abb. 2). Die rasche Generationsfolge des Phytoplanktons im Meer, das etwa 90% der ozeanischen Photosynthese bestreitet, hat zur Folge, daß der CO_2 -Photosynthese-Kreislauf im Meer praktisch kurz geschlossen ist und nur geringe Auswirkungen auf die Atmosphäre hat. Der Photosynthese-Kreislauf der Landpflanzen wirkt sich jedoch

voll aus, wie Abbildung 3 und deren Diskussion weiter unten zeigt. Der Kohlenstoffumsatz wird auf $50 \cdot 10^{15}$ gC/a geschätzt, was auf ein T von nur etwa 15 Jahren führt. Es ist klar, daß dieser außerordentlich rasche Kreislauf sehr genau ausgeglichen sein muß, da sonst erhebliche natürliche Schwankungen des CO_2 -Spiegels erwartet werden müssen, von denen jedoch bisher keine Anzeichen vorliegen.

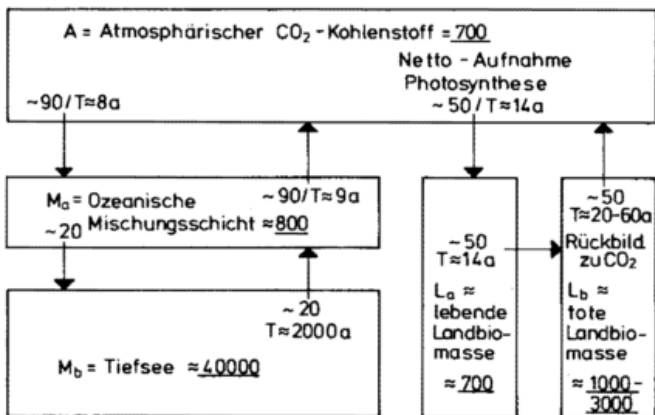


Abb. 2: Schematische Darstellung der zwei schnellen CO_2 -Kreisläufe. Angaben wie in Abb. 1; zusätzlich die Angaben der mit den entsprechenden Flüssen verbundenen Umwälzzeit T in Jahren. Die Daten in Anlehnung an HAMPICKE (1977), und andere Autoren.

Wie Abbildung 2 andeutet, wird das CO_2 in lebende Biomasse L_a , diese in tote Biomasse L_b , umgewandelt, die dann ihrerseits – meist durch bakterielle Tätigkeit – wieder zu CO_2 aufoxidiert wird. Die Reservoirs L_a und L_b werden in ca. 20 Jahren einmal umgesetzt, ein ungefährer Mittelwert des breiten Spektrums von Einzelwerten. So reichen die Möglichkeiten für die abgestorbene Biomasse von Wochen und Monaten bei abgefallenem Laub bis zu Jahrtausenden für Moore und Humus im Boden.

Die große Intensität des photosynthetischen Kreislaufs wird durch den resultierenden Jahresgang des atmosphärischen CO_2 deutlich vor Augen geführt (Abb. 3). Dabei ist zu bedenken, daß zu diesem Jahresgang nur die Breitenzone polwärts von ca. 30° beitragen, die Jahreszeiten kennen. Im Tropengürtel ist zwar der CO_2 -Austausch intensiver, aber gleichmäßig über das ganze Jahr verteilt. Weiter ist zu bedenken, daß ein wesentlicher Teil der photosynthetisch gebildeten Biomasse bereits durch die Respiration der lebenden Pflanzen zurückgebildet wird und sich unsere Zahlen nur auf die Nettoproduktion beziehen.

(5) Der *Kreislauf Atmosphäre-Ozean*: Dieser zweite schnelle Kreislauf ist relativ komplex, umfaßt er doch nicht nur den Austausch Atmosphäre-Ozean an der Wasseroberfläche, sondern auch die Mischungsvorgänge zwischen den Oberflächenwassern und der Tiefsee sowie den gesamten meeresbiologischen Kreislauf, der in sich selbst wiederum sehr vielgestaltig ist. Man könnte diesen Kreislauf also durchaus sinnvoll in weitere Kreisläufe aufspalten, aber wir wollen ihn im Einklang mit der Literatur hier als Einheit behandeln. Wie Abbildung 2 angibt, ist der resultierende atmosphärische Zustrom in die Mischungsschicht $90 \cdot 10^{15}$ gC/a, entsprechend einer Umwälzzeit T von etwa 8 Jahren, also von gleicher Größenordnung wie bei der Landphotosynthese. Ähnlich wie bei den Pflanzen des Tropengürtels resultiert dieser Kreislauf aber kaum in Schwankungen des atmosphärischen CO_2 , da Quellen und Senken zeitlich und

räumlich ziemlich gleichmäßig verteilt sind. Die Austauschvorgänge innerhalb des Ozeans sind erheblich komplexer als in diesem Kastenmodell dargestellt – wir gingen oben schon auf diese Frage ein und werden sie im nächsten Abschnitt näher besprechen. Da der Ozean die wesentliche, wenn nicht einzige Senke für das durch die menschlichen Aktivitäten zusätzlich produzierte CO_2 ist, so spielen sowohl die Mischungsvorgänge als auch die biologischen Prozesse im Ozean für das quantitative Verstehen des CO_2 -Anstiegs eine außerordentlich wichtige Rolle.

2.3 Die Regelmechanismen des atmosphärischen CO_2 -Spiegels

Für unser Problem des CO_2 -Anstiegs ist das Verstehen folgender *zwei Fragen* von grundlegender Bedeutung:

- (1) Welche Mechanismen kontrollieren unter quasistationären natürlichen Gleichgewichtsbedingungen den CO_2 -Spiegel der Atmosphäre? – Und:
- (2) Wie reagiert das CO_2 -System auf Störungen dieses Gleichgewichts?

Hätten wir ein vollständiges Modell des CO_2 -Systems, so ließen sich beide Fragen eindeutig quantitativ beantworten. Dies ist, wie erwähnt, noch nicht der Fall, und man muß daher versuchen, diese Fragen durch Teilbetrachtungen zu klären. Die erste Frage wurde schon in der vorangehenden Diskussion im wesentlichen beantwortet und wir brauchen das dort Gesagte – mit einigen Ergänzungen – nur noch einmal zusammenzufassen. Nach unserem derzeitigen Kenntnisstand ist es der langsame Verwitterungskreislauf der Urgesteine in Verbindung mit ionischen Gleichgewichtskonzentrationen, die sich bei der Tonmineralbildung und anderen Prozessen im Zuge des Verwitterungskreislaufes im Ozeanwasser einstellen, der grundsätzlich das mittlere CO_2 -Mischungsverhältnis unserer Atmosphäre von ca. 300 ppm bestimmt. Es läßt sich verständlich machen, daß die beiden anderen langsamen Kreisläufe keine fixierende Wirkung haben: Der Verwitterungskreislauf der Karbonate ist infolge der Quasisättigung des Ozeanwassers mit Karbonat dadurch charakterisiert, daß Quell- und Senkenfunktion linear miteinander gekoppelt sind, was die Fixierung einer stabilen Gleichgewichtskonzentration ausschließt. Die Unwirksamkeit des Verwitterungskreislaufs des organischen Kohlenstoffs ist noch leichter verständlich: Hier hängen sowohl die Quell- wie auch die Senkenfunktion überhaupt nicht vom CO_2 -Pegel ab – sondern nur vom Sauerstoffspiegel der Atmosphäre – und können daher nicht regulierend wirken. Aber auch die beiden schnellen Kreisläufe können praktisch keine Kontrolle ausüben und zwar aus folgendem, einfachen Grund: Wie Tabelle 1 zeigt, ist die Gesamtmenge des an der Erdoberfläche verfügbaren anorganischen Kohlenstoffs ($K_{an} = A + M_a + M_b = 41.500 \cdot 10^{15}$ gC) wesentlich größer als alle organischen Reservoirs zusammen ($K_{org} = M_c + M_d + L_a + L_b = 2050 - 4050 \cdot 10^{15}$ gC). Bei festliegenden Austauschfunktionen zwischen den anorganischen und den organischen Reservoirs sind praktisch wegen der Massenverhältnisse die organischen Reservoirs durch die anorganischen Reservoirs bestimmt und nicht umgekehrt.

Wir kommen damit zur zweiten Frage, wie das System auf die intensive Injektion von CO_2 in die Atmosphäre als Folge der menschlichen Tätigkeit reagiert. Infolge der relativ kurzen Austauschzeit von ca. 8 Jahren gleicht sich die Mischungsschicht an der Oberfläche des Ozeans mit nur

geringer Verzögerung an den atmosphärischen Anstieg an. Allerdings hat die Verschiebung der chemischen Gleichgewichte infolge der CO_2 -Aufnahme im Ozeanwasser nach Gleichung 2 – 4 zur Folge, daß bei einem Anstieg des CO_2 in der Atmosphäre um 10% die Summe $\Sigma(\text{CO}_2, \text{HCO}_3^-, \text{CO}_3^{2-})$ nur um ca. 1% ansteigt, wenn vollständiges Gleichgewicht hergestellt ist. Da die Reservoirs A und Ma ungefähr gleich sind, könnte bei fehlendem Austausch mit der Tiefsee, d.h. mit Mb, der Ozean also nur ca. 10% des vom Menschen produzierten CO_2 aufnehmen und nicht 50%, wie man zunächst vermuten könnte. Wäre im anderen Extrem der ganze Ozean, also auch die Tiefsee, dauernd gut durchmischt, so würden statt 90% nur 15% des eingebrachten CO_2 in der Atmosphäre verbleiben. Die Durchmischung der Tiefsee ist aber, bezogen auf menschliche Zeitmaßstäbe, langsam, nämlich einmal in 1000 bis 2000 Jahren, so daß der größte Teil des Ozeans in den nächsten 100 Jahren für die Aufnahme des vom Menschen produzierten CO_2 nicht nutzbar wird. Der schlechte Wirkungsgrad des Ozeans als Senke für das anthropogene CO_2 beruht also auf zweierlei: Auf seinem besonderen chemischen Verhalten und auf seiner schlechten Durchmischung. Die bisher tatsächlich vom Ozean aufgenommenen Anteile des anthropogenen CO_2 müssen natürlich zwischen den oben angegebenen Grenzen von 10% und 85% liegen und werden auf 30–50% geschätzt, je nach Modellannahmen.

Eine erstmalig in die Atmosphäre eingebrachte CO_2 -Menge würde also durch die Wirkung des Ozeans allein nach ca. 1000 bis 2000 Jahren erst auf 15% reduziert sein. Erst wenn die durch die Aufnahme des CO_2 im Ozeanwasser bedingte chemische Störung beseitigt wäre, würde auch die atmosphärische Störung sich allmählich vollständig ausgleichen. Die langsamen Verwitterungskreisläufe werden im Laufe mehrerer tausend Jahre diese chemische Störung eliminieren. Es ist aber anzunehmen, daß parallel dazu die photosynthetischen Kreisläufe über Land und im Ozean den Abbau der CO_2 -Störung merklich unterstützen, da höherer CO_2 -Gehalt bei sonst reichlich vorhandenen Naturstoffen die biologische Primärproduktion steigert. Wichtig ist jedoch die Erkenntnis, daß die natürlichen Regelmechanismen im Vergleich zu menschlichen Zeitskalen sehr langsam arbeiten, und daß es Jahrtausende dauern wird, ehe einmal eingetretene atmosphärische CO_2 -Störungen wieder abgebaut werden können.

3 Die Störung des atmosphärischen CO_2 -Spiegels durch den Menschen

Im Abschnitt 2 wurde die Rolle des atmosphärischen CO_2 im natürlichen Kohlenstoffsystem erläutert als Grundlage für das Verstehen der anthropogenen Störung. Ausgehend von dem beobachteten Anstieg des CO_2 in der Atmosphäre sollen in diesem Abschnitt Art und Umfang der anthropogenen Störung nach unserem heutigen Kenntnisstand analysiert werden, wobei auch auf die Kohlenstoffisotopendaten eingegangen werden muß. Anschließend wird dann eine Übersicht über die bisher vorliegenden Abschätzungen des CO_2 -Anstieges für Mitte nächsten Jahrhunderts gegeben, für den Fall, daß keine Beeinflussung der wirtschaftlichen Entwicklung angenommen wird.

3.1 Der beobachtete CO_2 -Anstieg in der Atmosphäre

Auf der Grundlage damals vorliegender CO_2 -Messungen begann CALLENDAR zuerst 1940 zu vermuten, daß der CO_2 -

Spiegel seit der Jahrhundertwende um ca. 10% angestiegen sei, und daß dieser Anstieg durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe bedingt sei (s. CALLENDAR 1958). Aber die bis in die 50er Jahre vorliegenden Messungen streuten stark und die Schlußfolgerung blieb unsicher. Diese Streuung war zum Teil auf mangelnde Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messungen zurückzuführen. Es muß aber auch bedacht werden, daß in der Nähe von Wäldern oder anthropogener Quellen der CO_2 -Gehalt in Bodennähe je nach Wetterlage erheblich schwanken kann (20% oder mehr). Es ist deshalb neben einwandfreien Methoden auch die Auswahl des Meßortes wichtig, wenn repräsentative Werte erhalten werden sollen. Es war deshalb ein großer Fortschritt, als im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957 KEELING mit systematischen, sauberen Messungen auf dem Observatorium Mauna Loa (in ca. 3000 Meter Höhe auf der Insel Hawaii) weitab von störenden Einflüssen begann. Die bis heute weitergeführte Meßreihe ist die längste ihrer Art und heute von außerordentlichem Wert. Später begannen auch an anderen Orten (Antarktik, Schweden, etc.) systematische Messungen. Abbildung 3 gibt solche Daten wieder. Man erkennt den weltweiten Anstieg des CO_2 -Spiegels von ca. 314 ppm um 1957 auf ca. 330 ppm um 1975. Eliminiert man die Jahressgänge aus solchen Meßreihen, so zeigt sich, daß die Angaben von "Reinluftstationen" recht gut übereinstimmen und nur um wenige ppm differieren. Dabei liegen die Werte auf der Nordhalbkugel verständlicherweise etwas höher, da hier die wesentlichen Quellen des fossilen CO_2 , etwa 90%, liegen. Auch heute ist die absolute Genauigkeit der Messungen nicht viel besser als etwa 1 ppm, und daher sind die mittleren großräumigen Unterschiede noch nicht genauer bestimmt.

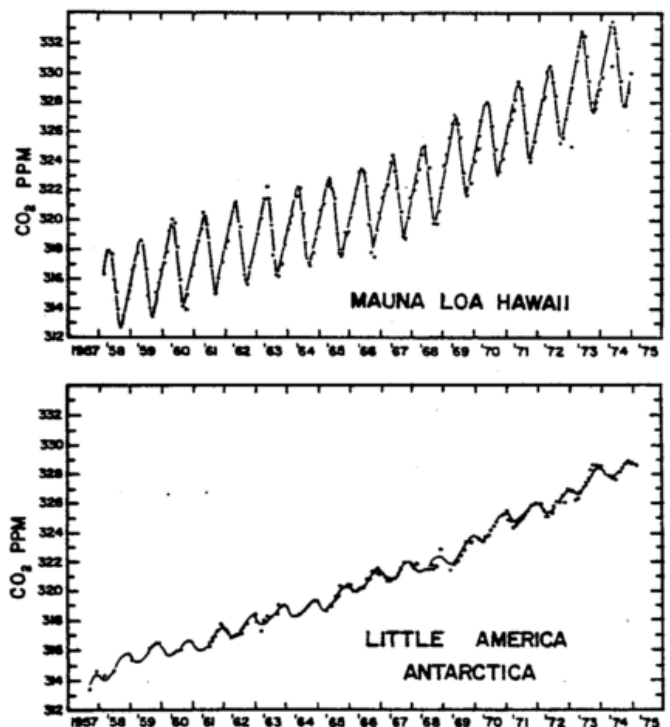


Abb. 3: Anstieg des CO_2 nach Messungen von KEELING (entnommen BROECKER et al., – Abb. 1 –, 1978) auf dem Mauna Loa Observatorium, Hawaii, und von der Antarktisk-Station Little America. Auf der letzteren Station wurden die Messungen zunächst nur zeitweise durchgeführt; der anfängliche Verlauf ist deshalb stark interpoliert.

Abbildung 3 zeigt einen Jahresgang, der in der Nordhemisphäre wesentlich ausgeprägter ist. Dieser Jahresgang ist die Folge des schnellen Photosynthesekreislaufs: Im Frühjahr mit Beginn der Wachstumsperiode wird CO_2 aus der Atmosphäre entnommen und dann im Winter durch die Oxidation der absterbenden Biomasse zurückgebildet. An diesem Jahresgang beteiligt sich natürlich nur die Pflanzenwelt der gemäßigten Zonen polwärts von etwa 30° Breite, wie oben schon erläutert, und dieser Anteil ist in der Südhemisphäre wesentlich geringer. Wie zu erwarten, sind die beiden Jahresgänge in Hawaii und in der Antarktis um ca. 6 Monate zeitlich verschoben. Es läßt sich jedoch mittels globaler Austauschrechnungen (BOLIN und KEELING, 1963) zeigen, daß ein merklicher Anteil des südhemisphärischen Jahresganges durch den über den Äquator hinübergreifenden nordhemisphärischen Jahresgang bedingt ist und dabei ebenfalls eine Verzögerung von ca. 6 Monaten erleidet.

Auch ohne daß – wie in Abbildung 3 – die Jahresgänge eliminiert werden, erkennt man, daß der langsame Anstieg nicht ganz gleichmäßig erfolgt, z. B. von 1963 bis 1968 deutlich verzögert ist. Eine entsprechende Unregelmäßigkeit ist in den Statistiken über den weltweiten Verbrauch von Brennstoffen nicht ausgewiesen und muß daher andere Ursachen haben. NEWELL und WEARE (1977) vermuten, daß großräumige und über mehrere Jahre sich erstreckende Schwankungen der Ozeantemperaturen im Süd-Pazifik, vor allem im Bereich des Humboldt-Stromes an der Westküste Süd-Amerikas zu einem merklichen Anteil dafür verantwortlich sind. Eine weitere Aufklärung dieses Zusammenhangs wäre sehr erwünscht für ein besseres Verständnis der Rolle, die der Ozean im globalen CO_2 -Haushalt spielt.

3.2 Die anthropogene Störung des Kohlenstoffkreislaufsystems

Bis vor kurzem wurde angenommen, daß der Mensch das atmosphärische CO_2 nur durch Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas angehoben habe. Der Anteil an Verbrauch lebender Biomasse wurde als gering angesehen, wohl z. T. deshalb, weil darüber nur schwer statistische Angaben zu erhalten waren. Heute ist man weitgehend der Ansicht, daß zusätzlich merkliche Mengen CO_2 dadurch in die Atmosphäre gelangen, daß einerseits das Reservoir La infolge Rodung der Wälder, vor allem in den Tropen, abnimmt, und das andererseits das Reservoir Lb als Folge der ständigen Expansion und Intensivierung der landwirtschaftlich genutzten Flächen schrumpft. Beide Vorgänge sind z. T. miteinander gekoppelt und wurden vor allem im Laufe der letzten 100 – 200 Jahre wirksam als Folge der Zunahme der Weltbevölkerung und des Anhebens des Lebensstandards (BOLIN, 1977; WOODWELL et al., 1978).

Aus Statistiken läßt sich die CO_2 -Produktion infolge Verbrauchs an fossilen Brennstoffen und industrieller Prozesse ziemlich gut erfassen. Die heutige Produktionsrate ist etwa $5 \cdot 10^{15}$ gC/a. Sie ist in den letzten hundert Jahren angenähert exponentiell mit einer jährlichen Zuwachsrate von 3,5 – 4% angewachsen. Die Gesamtmenge beträgt dann etwa $140 \cdot 10^{15}$ gC in den letzten 100 Jahren, mit vernachlässigbaren Anteilen in den Jahren davor (s. Tab. 2).

Sehr unsicher sind die Zahlen für die Veränderungen der Reservoirs La und Lb. Die Unsicherheit liegt an dem Mangel verlässlicher und für globale Abschätzungen repräsen-

Tabelle 2: Abschätzungen des vom Menschen in die Atmosphäre eingebrachten CO_2 , ausgedrückt in 10^{15} Gramm Kohlenstoff

Quelle	Heutige Produktionsrate (pro Jahr)	Akkumulierter Gesamtbeitrag (etwa 1975)	Akkumulierter Betrag in Prozent des heutigen atmosphärischen Kohlenstoffgehalts
Fossile Brennstoffe und Zementfabrikation	5 ¹⁾	140 ¹⁾	20%
Netto-Abnahme der Wälder; ΔLa	$0,8 \pm 0,8$ ¹⁾ $5,8 + 7,2$ ²⁾ $- 4,5$	45 ± 15 ¹⁾ —	6,5% ¹⁾ —
Netto-Abnahme der organischen Substanz in Böden, etc.; ΔLb	$0,3 \pm 0,2$ ¹⁾ $2 + 3,0$ ²⁾ $- 1,5$	24 ± 15 ¹⁾ —	3,4% ¹⁾ —

¹⁾ BOLIN, 1977

²⁾ WOODWELL et al., 1978

tativer Zahlen. In Tabelle 2 haben wir die Zahlenwerte zweier wichtiger Arbeiten zu dieser Frage gegenüber gestellt. An dem erheblichen Unterschied erkennt man das Maß subjektiver Wertung, da die benutzten Ausgangsdaten der Literatur mehr oder weniger die gleichen waren. Wir glauben jedoch, daß die obere Grenze von WOODWELL et al., unrealistisch ist. Es scheint aber, daß der Anteil durch Schrumpfung von La und Lb nicht vernachlässigt werden kann.

Die Schwierigkeiten, bessere Zahlen für ΔLa und ΔLb zu bekommen, sind erheblich. Will man solche Zahlen durch direkte Messungen gewinnen, so müßten genaue Überwachungen der lebenden und toten Biomasse an einer großen Zahl typischer geographischer Orte viele Jahre hindurch durchgeführt werden, ein sehr aufwendiges und langwieriges Unterfangen. Und auch dann hätte man nur die augenblicklichen Änderungen erfaßt und nicht die der Vergangenheit. Eine andere elegantere und vielleicht erfolgversprechendere Methode basiert auf Messungen der Kohlenstoffisotopen, der wir uns jetzt zuwenden wollen.

3.3 Die Bedeutung von Kohlenstoffisotopendaten für die Interpretation des Kohlenstoffkreislaufsystems

Der natürliche Kohlenstoffkreislauf enthält zu 1,1% das stabile Isotop ^{13}C , der Rest ist ^{12}C , neben Spuren des radioaktiven Isotops ^{14}C . Bei dem Photosyntheseprozess wird das leichte ^{12}C -Isotop bevorzugt in das Pflanzenmaterial eingebaut mit dem Resultat, daß der ^{13}C -Gehalt um etwa 20‰ geringer ist als der des atmosphärischen CO_2 . Die fossilen Brennstoffe Kohle, Öl und Naturgas zeigen in ihrer jetzigen globalen Verbrauchs-Kombination fast die gleiche Verarmung an ^{13}C . Dies ist nicht überraschend, da diese Brennstoffe ja durch den gleichen Prozess entstanden sind wie das heutige Pflanzenmaterial. Bei der Photosynthese

muß natürlich eine geringe Anreicherung an ^{13}C in der Luft stattfinden, die der Anreicherung im Pflanzenmaterial entspricht. Befindet sich der Kreislauf im Gleichgewicht, kompensieren sich diese Effekte bei der Rückbildung des organischen Materials zu CO_2 , und der ^{13}C -Gehalt des atmosphärischen CO_2 bleibt zeitlich unverändert. Wird jedoch Pflanzenmaterial oder fossiler Brennstoff verbrannt, so wird der Anstieg des CO_2 von einem Absinken des ^{13}C -Gehaltes begleitet sein. Man kann dies sehr exakt beobachten bei örtlichen CO_2 -Schwankungen in Bodennähe, die ja ganz überwiegend durch diese Prozesse bedingt sind: Der Korrelationskoeffizient zwischen den CO_2 und den ^{13}C -Variationen ergibt sich zu 0,99! Das Einbringen von CO_2 in die Atmosphäre durch Verbrennen fossiler Brennstoffe und/oder Abholzens der Wälder und Vernichtung des Humus muß sich großräumig und langfristig in gleicher Weise auf den ^{13}C -Spiegel auswirken. Nun läßt sich grundsätzlich aus der Isotopenanalyse einzelner Baumringe der historische Verlauf des ^{13}C -Gehaltes des atmosphärischen CO_2 ermitteln. Allerdings muß man u.a. darauf achten, daß nur sehr isoliert und in reiner Luft wachsende Bäume verwendet werden, sonst assimiliert der Baum nicht repräsentatives CO_2 . Da die Meßeffekte sehr klein sind und auch noch pflanzenphysiologische Effekte auftreten, ist es erforderlich, möglichst viele Messungen in verschiedenen Teilen der Erde und an verschiedenen Pflanzenarten durchzuführen.

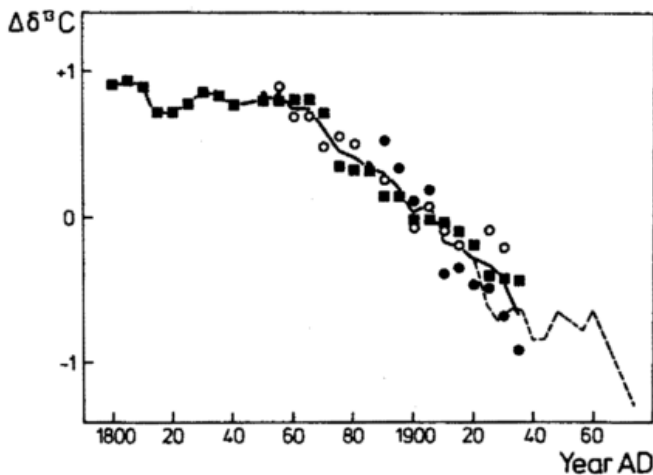


Abb. 4: Die Änderung des ^{13}C -Gehaltes in Baumringen nach FREYER (1978). Messungen für das Zeitintervall vor etwa 1930 von drei Bäumen: *Pinus silvestris* (Quadrate), *Pseudotsuga toxifolia* (offene Kreise) und *Aesculus hippocastanum* (volle Kreise). Die gestrichelte Linie ab 1920 basiert auf 26 anderen Bäumen. Man erkennt den Beginn eines deutlichen Abfalls um 1860, bevor der Verbrauch fossiler Brennstoffe nennenswerte Beträge erreicht hatte.

Abbildung 4 zeigt die z.Z. umfassendste und sorgfältigste Datenzusammenstellung (FREYER, 1978). Man erkennt, daß der gesamte Effekt über 100 Jahre hinweg nur 2‰ der Änderung des Isotopenanteils von ^{13}C beträgt, daß aber ganz deutlich infolge der hohen Meßgenauigkeit der ^{13}C -Gehalt um 1860 abzusinken beginnt, lange bevor der Verbrauch fossiler Brennstoffe einen merklichen Anteil erreicht hatte. Es besteht kaum Zweifel, daß sich hierin das Schrumpfen der Reservoirs L_a und L_b widerspiegelt.

Neben dem ^{13}C enthält das atmosphärische CO_2 noch das radioaktive Isotop ^{14}C , das laufend in der Atmosphäre durch Höhenstrahlung aus Stickstoff gebildet wird und eine Halbwertszeit des radioaktiven Zerfalls von 5.700 Jahren hat. Fossile Brennstoffe enthalten also kein ^{14}C mehr – sie sind "tot". Während man bei ^{13}C keinen Unterschied zwischen fossilen und rezentem biologischen Material machen kann, zeigt eine Abnahme des ^{14}C -Gehaltes im Luft- CO_2 ausschließlich den Verbrauch fossiler Brennstoffe an. Durch Kombination der ^{13}C - und ^{14}C -Daten kommt FREYER zu den in Tabelle 3 wiedergegebenen, allerdings noch als vorläufig bezeichneten Abschätzungen. Für den fossilen Brennstoff wurden die direkt gewonnenen Daten (s. Tab. 2) übernommen. Die Angaben für die nicht fossilen Brennstoffe, die sich also auf die Änderungen von L_a und L_b beziehen, sind etwas höher als die geschätzten Werte von BOLIN, aber tiefer als die von WOODWELL (Tab. 2). Dieses Ergebnis ist eine wichtige, völlig unabhängige grundsätzliche Bestätigung der Schätzungen in Tabelle 2. Es ist sicherlich sehr wünschenswert, wenn diese Daten durch weitere Arbeiten abgesichert und erweitert werden können.

Tabelle 3: Vorläufige Abschätzungen atmosphärischer CO_2 -Eingaben aufgrund von ^{13}C - und ^{14}C -Messungen, nach FREYER (1978):

Art der CO_2 -Quelle	Fossile Brennstoffe	Nicht fossile Brennstoffe
Gesamtmenge des seit 1850 der Atmosphäre zugefügten CO_2 -Kohlenstoffs in 10^{15} gC	136	70
Gegenwärtige CO_2 -Kohlenstoff-Eingabe in die Atmosphäre in 10^{15} g/Jahr	5	3 ± 2

4 Die Abschätzung des zukünftigen CO_2 -Anstiegs bei unkontrolliertem wirtschaftlichen Wachstum

Die Möglichkeit einer solchen Abschätzung setzt zweierlei voraus:

- (1) Ein genügend realistisches mathematisches Modell der schnellen Kreisläufe, und
- (2) Eine Abschätzung über die zukünftige anthropogene CO_2 -Produktion.

Das in Abbildung 2 dargestellte Kastenmodell ist ein Beispiel dafür, wie die schnellen Kreisläufe bisher grundsätzlich quantitativ angenähert wurden: Bei Kenntnis der Reservoirgrößen und der Austauschflüsse zwischen diesen kann man für jedes Reservoir eine Stoffhaushaltsgleichung aufstellen und mit diesem Gleichungssystem z.B. den CO_2 -Anstieg berechnen, wenn die zukünftige CO_2 -Produktion als Funktion der Zeit eingegeben wird. Die Austauschflüsse zwischen den Reservoiren werden dabei mangels besserer Kenntnis meist proportional der Reservoirgröße angesetzt, z.B. der Fluß von L_b in die Atmosphäre mit $K \cdot L_b$, wo K der Kehrwert der Austauschzeit oder Umwälzzeit des Reservoirs bezüglich dieses Flusses ist. Die weniger sicher bekannten Reservoirgrößen und K -Werte, insbesondere die der Mischungsschicht und Tiefsee, werden in diesen Modellen im Rahmen des Plausiblen so abgeändert, daß für die vergan-

genen Jahre der beobachtete Anstieg mit dem berechneten Anstieg übereinstimmt. Es ist klar, daß solche Übereinstimmung mit dem beobachteten CO₂ nicht bedeuten kann, daß der Satz von Parametern richtig ist, noch, daß das Modell selbst die natürlichen Verhältnisse realistisch beschreibt. In dieser Weise wurden zahlreiche Rechnungen durchgeführt. Eine wesentliche Verbesserung dieses Modells wurde kürzlich dadurch erreicht, daß der Ozean, statt durch zwei getrennte Reservoirs, wie in Abbildung 2 durch ein Kastendiffusionsmodell angenähert wurde: Von der wie in Abbildung 2 angenommenen oberflächlichen Mischungsschicht dringt das CO₂ durch turbulente Mischung in die Tiefsee vor, wobei die turbulenten Diffusionskoeffizienten aus anderen ozeanischen Studien abgeleitet werden konnten. Die mit diesem Modell durchgeführten Rechnungen des vergangenen Verhaltens (seit Ende vorigen Jahrhunderts) des CO₂ und seiner Isotopenwerte stimmen mit den Beobachtungen besser überein, auch ohne Parameterabgleich, so daß erwartet werden kann, daß auch die Vorausberechnungen der zukünftigen CO₂-Entwicklung zulässig sind.

Eine erhebliche Unsicherheit entsteht durch das ungewisse Verhalten von La und Lb. Bis vor zwei Jahren wurde angenommen, daß La und Lb in der Vergangenheit konstant geblieben waren oder daß La etwa zugenommen hatte infolge der mit dem CO₂-Anstieg einhergehenden "CO₂-Düngung". Das heißt, neben dem Ozean wirkte auch noch La zu einem gewissen Grade als Senke für das CO₂ der fossilen Brennstoffe. Bei Schrumpfung von La und Lb, wie es heute weitgehend angenommen wird, hätte in dem vergangenen Jahrhundert der Ozean außer dem "Brennstoff-CO₂" auch noch das "Schrumpfung-CO₂" aufnehmen müssen, das heißt, der Ozean hätte eine wirkungsvollere Senke als im ersten Fall darstellen müssen.

Rechnungen mit den älteren reinen Kastenmodellen ergaben, daß die Angleichung unsicher bekannter Parameter es stets erlaubt, sowohl eine Zunahme von La, wie auch eine Abnahme von (La und Lb) mit den bisherigen CO₂-Beobachtungen in Einklang zu bringen. Die Rechnungen mit dem Kastendiffusionsmodell des Ozeans, bei dem solch ein Angleich nicht gemacht wurde, ergaben jedoch bei Abnahme von (La und Lb) einen zu starken Anstieg des CO₂ seit Ende des vorigen Jahrhunderts. Offensichtlich aus dem Grunde, weil der Ozean nicht imstande war, den vermehrten Anfall an CO₂ aufzunehmen. Dies Ergebnis steht im Widerspruch zu den vorliegenden Kohlenstoffisotopendaten und den Abschätzungen über die Schrumpfung von La und Lb. Es ist zur Zeit nicht klar, wie diese Diskrepanz beseitigt werden kann, aber es ist klar, daß dies geschehen muß, wenn wir zuverlässige Abschätzungen des künftigen durch Brennstoffverbrauch verursachten CO₂-Anstiegs durchführen wollen. Denn wenn eine Schrumpfung von La und Lb eingetreten ist, bedeutet dies, daß der Ozean eine bessere Senke darstellt als im anderen Fall und daher auch in Zukunft als bessere Senke für das "Brennstoff-CO₂" wirken könnte.

Wir kommen nun zu der zweiten Frage nach der zukünftigen CO₂-Produktion. Fast alle Autoren nehmen für die Zukunft ein exponentielles Wachstum von 3,5 – 4% pro Jahr bis etwa zur Mitte des nächsten Jahrhunderts an, ähnlich dem mittleren Wert dieses Jahrhunderts. Bei dieser Zuwachsrate soll die Entwicklung der Kernenergie berück-

sichtigt sein. Ab Mitte nächsten Jahrhunderts beginnt sich dann allmählich die Erschöpfung der Summe der fossilen Brennstoffe Kohle, Öl und Gas bemerkbar zu machen und die Zuwachsrate abzunehmen. Dabei wird angenommen, daß vorher schon mit Beginn des nächsten Jahrhunderts verstärkt Gas und Öl durch Kohle ersetzt werden, da ihre Lagerstätten sich sehr wahrscheinlich rascher erschöpfen werden als die der Kohle.

Es ist klar, daß diese Extrapolationen des fossilen Brennstoffverbrauchs bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts im Falle eines unkontrollierten Wirtschaftswachstums erhebliche Unsicherheiten enthalten. Einmal könnte die Weltbevölkerung langsamer wachsen als bisher allgemein angenommen – Anzeichen dafür liegen vor. Dann könnte aus politischen und wirtschaftlichen Gründen das Wachstum zurückgehen. So lag z. B. von 1914 bis 1947, also in einem Zeitraum von über 30 Jahren die mittlere Wachstumsrate unter 2% als Folge der beiden Weltkriege, und es ist keineswegs unwahrscheinlich, daß sich Ähnliches wiederholt.

Das eben Gesagte bezog sich nur auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe. Eine Vorhersage über die zukünftige Entwicklung von La oder gar Lb ist noch wesentlich schwieriger. Man hat versucht, diese Schrumpfung dadurch in Rechnung zu setzen, daß sie direkt mit dem Brennstoffverbrauch gekoppelt wurde, aus dem Gedanken heraus, daß letztlich beides die gleiche Ursache hat. Das könnte dann einfach einem höheren Brennstoffverbrauch gleichen (s. z.B. ZIMEN et al., 1977).

Geht man mit diesen Annahmen über den zukünftigen Brennstoffverbrauch in die verschiedenen Modelle ein, so zeigt sich, daß die reinen Kastenmodelle relativ ähnliche Werte über den CO₂-Anstieg bis etwa zum Jahre 2050 liefern, mit stärkerer Divergenz danach (s. z.B. ZIMEN et al., 1977). Das liegt im wesentlichen daran, daß diese Modelle an die bisher vorliegenden CO₂-Meßreihen mit ihren Parametern angeglichen wurden. Die Rechnungen ergeben, daß das CO₂ bis zum Jahre 2050 etwa um den Faktor 3 ansteigen würde mit weiterer Zunahme bis 2100.

Mit dem Kastendiffusionsmodell wurden, etwas abweichend, zwei plausible Grenzwerte für das CO₂-Wachstum der Zukunft berechnet (SIEGENTHALER und OESCHGER, 1978), und zwar wie folgt: Eine untere Wachstumsgrenze unter der Annahme, daß die CO₂-Produktionsrate ab 1975 konstant bleibt, also nicht exponentiell wächst, und eine obere Grenze mit einer exponentiellen Wachstumsrate von 5%. Im ersten Fall würde das CO₂ um 2050 auf etwa 400 ppm angestiegen sein (Faktor 1,3), im zweiten Fall auf 1300 ppm (Faktor 4). Bei mittleren Wachstumsraten kann man, ähnlich wie oben, mit einem Faktor von etwa 3 rechnen.

Auch wenn wir die bisher bestehenden Unsicherheiten in den Modellen der schnellen Kreisläufe in Rechnung setzen, können wir mit großer Wahrscheinlichkeit den Schluß ziehen, daß im Laufe der ersten Hälfte des nächsten Jahrhunderts der CO₂-Spiegel unserer Atmosphäre auf mindestens das doppelte ansteigen müßte, wenn der Energiebedarf etwa wie bisher im Zuge der Zunahme der Weltbevölkerung und der Tendenz zu höherem Lebensstandard

in den sich entwickelnden Ländern ansteigen würde, und wenn dieser Energiebedarf im wesentlichen durch fossile Brennstoffe gedeckt werden muß, wenn also mit anderen Worten die bisherige Entwicklung nur den inneren wirtschaftlichen Grenzen folgen würde. Dies ist ein sehr wichtiges Ergebnis, das heute weitgehend akzeptiert wird. Wir werden in dem nächsten Abschnitt sehen, daß ein solcher CO₂-Anstieg ebenfalls mit großer Wahrscheinlichkeit zu nicht mehr tolerierbaren Klimaänderungen führen müßte.

5 Die klimatischen Auswirkungen eines CO₂-Anstiegs und mögliche Energiestrategien der Zukunft

Die Frage nach der klimatischen Auswirkung eines CO₂-Anstiegs wurde in mehreren Arbeiten untersucht, wobei ein-, zwei- und auch dreidimensionale Modelle erheblicher Komplexität zur Anwendung kamen. In jedem Falle mußten jedoch verschiedene vereinfachende Annahmen gemacht werden. Die umfassendste Studie dieser Art, die der atmosphärischen Wirklichkeit wohl am nächsten kommt, ist die von MANABE und WETHERALD (1975), auf die wir uns deshalb auch konzentrieren wollen. Diese Autoren benutzten ein dreidimensionales Zirkulationsmodell mit vereinfachter geographischer Verteilung von Land und Meer, wobei das Meer jedoch praktisch nur als eine stets feuchte Erdoberfläche ohne Wärmekapazität wirkt. Der kurz- und langwellige Strahlungshaushalt wird unter Berücksichtigung der Gase H₂O, CO₂ und O₃, der Wolkenbedeckung sowie einer veränderlichen Erdalbedo berechnet. Die O₃-Verteilung und die Wolkenbedeckung werden nach klimatischen Daten als Funktion der Breite und Höhe eingegeben. Der Wasserdampf wird mittels der prognostischen Gleichungen aus Verdunstung und Niederschlag berechnet, ein wesentlicher Fortschritt gegenüber den früheren Modellen, wo dieser durch Annahme fixiert wurde. Das Modell berücksichtigt ferner die Rückkopplung zwischen Temperatur und Änderung der Albedo infolge Schneebedeckung in polaren Breiten. Berechnet wird die dreidimensionale Temperatur- und Feuchteverteilung sowie die Breitenverteilung des Niederschlags und zwar einmal für das jetzige CO₂-Mischungsverhältnis und dann für den Fall seiner Verdoppelung, d.h. für 300 und 600 ppm. Es werden mittlere jahreszeitliche Verhältnisse bezüglich Sonnenstrahlung etc. angenommen und keine jahreszeitlichen Änderungen studiert.

Die wesentlichsten Ergebnisse sind folgende: Die mittlere Oberflächentemperatur steigt bei einer Verdoppelung des CO₂ um 2,9°C an. Infolge der Berücksichtigung der polaren Schneebedeckung bei der Albedo wächst diese Temperaturerhöhung polwärts um Faktoren von 2 bis 3 an, in guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen vergangener Klimaschwankungen, bei denen sich stets zeigte, daß die höheren Breiten die größten Amplituden aufweisen und am empfindlichsten reagieren — eben wegen der Albedo-Rückkopplung. Die Troposphäre erwärmt sich als Ganzes, die Stratosphäre wird kälter. Die relative Feuchte nimmt in den untersten Troposphärenschichten um einige Prozent zu. Damit wird klar, daß die absolute Feuchte mit einem CO₂-Anstieg deutlich steigt und den CO₂-Effekt verstärkt, wie es frühere Modelle z.T. auch in ihren Annahmen bzgl. der Feuchte vermutet hatten. Verdampfung und Niederschlag nehmen als Folge der Temperaturerhöhung in den meisten Breiten zu um Beträge

von der Größenordnung 10%. Der gesamte hydrologische Kreislauf wird also global intensiviert.

Wie schon gesagt, ist dieses Modell umfassender und realistischer als die früheren, trotzdem enthält es immer noch bedenkliche Vereinfachungen. Es ist vor allem die Annahme konstanten Bewölkungsgrades, die zu denken gibt, denn es ist bekannt, wie stark der Bewölkungsgrad via Albedo in den globalen Strahlungshaushalt eingeht. So entspricht einer Abnahme der mittleren Albedo um nur 1% einer mittleren Temperaturerhöhung von etwa 1°C. Einer Albedoänderung von 1% entspricht eine Änderung der mittleren Bewölkung von 1–2% je nach Art der Bewölkung, Beträge, die sehr gering sind und sich zur Zeit jeder Erfassung durch Messung, auch mittels Satelliten, entziehen. Eine Änderung der mittleren Bewölkung von ca. 1–2% infolge der oben angegebenen Änderungen des hydrologischen Kreislaufs, der relativen Feuchte und der Temperatur könnte aber ohne große Schwierigkeiten vermutet werden und würde die Ergebnisse stark modifizieren. Bedenkt man, daß Bewölkungsgrad und Niederschlagsmenge je nach Art des Niederschlags und Klimas sowohl positiv wie negativ miteinander korreliert sein können, so ist es schwer, selbst das Vorzeichen dieser Modifikation abzuschätzen, geschweige denn ihren Betrag. Die anderen Vereinfachungen im Modell wie z. B. die der Ozeaneigenschaften scheinen weniger gravierend.

Es ist interessant, festzustellen, daß einfachere aber sonst wohl begründete neuere Modelle Anstiege der mittleren Bodentemperatur von 2°C und etwas darüber geben, also in guter Übereinstimmung mit dem Ergebnis von MANABE und WETHERALD sind. Wir können daraus wohl den Schluß ziehen, daß man vorbehaltlich der durch die Vereinfachungen in den Modellen möglichen Fehler mit einem mittleren Temperaturanstieg an der Erdoberfläche von 2–3°C bei Verdoppelung des CO₂ rechnen kann bei gleichzeitig etwas steigender relativer Feuchte und Niederschlag.

Es muß natürlich hier auch kurz die Frage erörtert werden, ob in der Zukunft mit anderen anthropogenen Einflüssen auf das globale Klima gerechnet werden kann, die den CO₂-Effekt entweder verstärken oder abschwächen. Folgende Möglichkeiten sind zu nennen:

- (1) Langfristige Änderung der Albedo der Erdoberfläche infolge Änderung der Landnutzung, Abholzung der Wälder, etc.: Dieser Effekt hat wahrscheinlich über die letzten Jahrtausende hinweg zu einem Temperaturrückgang von 1°C geführt, wird aber für die nähere Zukunft kaum ins Gewicht fallen, (FLOHN, vgl. hierzu Beitrag BAUMGARTNER u.a. S. 32 ff.).
- (2) Erhöhung des Aerosolgehaltes der Troposphäre und sein direkter Einfluß auf den Strahlungshaushalt: Dieser Effekt scheint gering, auch für die nähere Zukunft.
- (3) Erhöhung der Konzentration der Wolkenkondensationskerne und dadurch bedingte Erhöhung der Wolkenalbedo: Dies könnte ein wichtiger Faktor sein, der zu einem Rückgang der Temperatur führen müßte — aber quantitative Abschätzungen sind noch kaum möglich.

- (4) Alle anthropogen beeinflussten mehratomigen Gase, die wie H_2O und CO_2 im Infrarot absorbieren, können prinzipiell den Strahlungshaushalt der Atmosphäre ändern. Solche Abschätzungen wurden z.B. vorgenommen für N_2O , CH_4 , NH_3 , Chlorfluormethane – aber meist unter Annahme unrealistisch großer Erhöhungen der Konzentrationen. Legt man realistische, auf der Kenntnis ihrer Kreisläufe basierende Schätzungen über mögliche Erhöhungen zugrunde, so ergibt sich ein geringfügiger Einfluß dieser Gase für die nähere Zukunft.
- (5) Eine globale Erhöhung der mittleren Temperatur als Folge der direkten Energieproduktion durch den Menschen bleibt gering gegenüber dem indirekten Strahlungseffekt durch CO_2 , sofern auch in Zukunft ein merklicher Anteil des Energiebedarfs durch fossile Brennstoffe gedeckt bleibt. Da dies sehr wahrscheinlich der Fall sein wird, kann dieser Effekt für globale Betrachtungen (jedoch nicht für lokale!) unberücksichtigt bleiben.

Man sieht, daß wahrscheinlich nur Prozeß Nr. 3 ernsthaft ins Gewicht fallen könnte, und zwar in einer Weise, daß er die CO_2 -Erwärmung z.T. kompensieren würde. Die anderen Möglichkeiten erscheinen für die absehbare Zukunft d.h. bis Mitte des nächsten Jahrhunderts, kaum von Bedeutung, verglichen mit den vermuteten Effekten des CO_2 , wenn man dessen Verdoppelung oder sogar eine stärkere Zunahme bei unkontrolliertem Wachstum für die Zukunft annimmt. Diese Sachlage würde sich jedoch ändern, falls infolge von Energiestrategien die CO_2 -Produktion gedrosselt wird.

Akzeptieren wir nach dem oben Gesagten einen Anstieg der mittleren Erdoberflächentemperatur von $2-3^\circ C$ bei einer Verdoppelung des CO_2 -Gehaltes und bedenken, daß er möglicherweise bei unkontrolliertem Wachstum bis zum Jahr 2050 sogar noch stärker ansteigen kann, so bedeutet dies eine globale Klimabeeinflussung, die außerhalb der in den letzten Jahrhunderten beobachteten, ja in der postglazialen Periode vermuteten natürlichen Erwärmungen liegt und damit ohne Zweifel ein sehr ernstes Problem für die Menschheit als Ganzes darstellt.

Abgesehen von der Feststellung, daß in höheren Breiten der Effekt merklich größer ausfallen wird, läßt sich z.Z. nicht übersehen, wie die regionalen Auswirkungen der Änderungen von Temperatur und Niederschlag sein werden. Aber darauf kommt es entscheidend an in einer Welt, in der die Lebensräume der Völker fixiert sind und ein Ausweichen durch großräumige Wanderungen wie in der Vergangenheit nicht mehr möglich ist. Angesichts dieser Realitäten ist es deshalb etwas fragwürdig, darauf zu verweisen, daß ungünstige Entwicklungen in *einer* Region durch günstige Entwicklungen in *anderen* Regionen ausgeglichen werden können, ja daß sich unter Umständen eine Erwärmung durch CO_2 für die Menschheit im Ganzen gesehen positiv auswirken könnte.

Angesichts dieser Situation erscheint es dringend geboten, sich die Frage vorzulegen, wie der bei unkontrolliertem Wachstum zu erwartende CO_2 -Effekt begrenzt werden kann. Schaltet man eine einschneidende Beschränkung des Bevölkerungswachstums und des Trends zu höherem Le-

bensstandard vor allem in den sich entwickelnden Ländern als unrealistische Zielsetzungen aus, so bleibt nur die Möglichkeit, den Verbrauch fossiler Brennstoffe zu drosseln und in verstärktem Maße auf andere Energiequellen überzugehen. Man muß dabei bedenken, daß es nach den bisherigen Erfahrungen vieler Jahrzehnte bedarf, bis sich neue Energiegewinnungsformen bis in die Praxis hinein durchgesetzt haben und sollte deshalb mit den notwendigen Planungen unverzüglich beginnen. Die ersten Ansätze dafür, daß sich Klimaforscher, Energiefachleute und verantwortliche staatliche Stellen gemeinsam der Problematik anzunehmen beginnen, sind vorhanden, und es ist nur zu hoffen, daß diese Bestrebungen ungeachtet der Grenzen, Ideologien und politischen Systeme in fruchtbarer Weise intensiviert werden.

Eine der zur Zeit ins Auge gefaßten Strategien geht von dem Gedanken aus, eine maximal tolerierbare CO_2 -Erhöhung festzulegen, z.B. eine Erhöhung um 50%, also von 300 ppm auf 450 ppm. Dies würde einer mittleren Erhöhung der Temperatur von ca. $1-1,5^\circ C$ entsprechen und damit noch im Rahmen der bisherigen Erwärmungen bleiben. Man kann dann mit Hilfe der CO_2 -Kreislafmodelle die maximal mögliche Verbrauchsrate fossiler Brennstoffe als Funktion der zukünftigen Zeit berechnen, die diese Bedingung erfüllt. Energieanforderungen, die über diese klimatisch fixierten fossilen Brennstoffanteile hinausgehen, müßten dann durch andere Energiearten abgedeckt werden.

Solche CO_2 -Strategien sind erarbeitet worden, wobei die oben erwähnten Unsicherheiten in unserem Verständnis der schnellen CO_2 -Kreisläufe im Auge behalten werden müssen. Rechnungen mit dem fortschrittlichen Ozeanmodell (SIEGENTHALER und OESCHGER, 1978) ergaben z.B., daß die heutige CO_2 -Produktionsrate bis zum Jahre 2000 noch um etwa 50% anwachsen darf, – je nach der Modellannahme über die Rolle der Reservoirs La und Lb, etc., und daß sie dann im Laufe des nächsten Jahrhunderts wieder drastisch auf Werte zurückgehen muß, wie sie etwa um die Mitte dieses Jahrhunderts beobachtet wurden. Bei dieser Strategie werden also kurzfristig den fossilen Brennstoffen maximale Möglichkeiten eingeräumt, bevor andere Energieformen übernommen werden müssen. Der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre erreicht dann etwa um die Mitte des nächsten Jahrhunderts den maximal tolerierbaren Wert. Andere Strategien mit einer stärkeren Drosselung der CO_2 -Produktion bis Ende dieses Jahrhunderts wären noch schwieriger zu realisieren. Man erkennt an solchen Betrachtungen, wie stark die Menschheit unter Zeitdruck steht, neue Energieformen zu entwickeln, falls die bisherigen Schätzungen des zukünftigen Bedarfs auch nur einigermaßen realistisch sind. Der Bedarf an anderen Energieformen wird dann vermutlich erheblich sein.

Literatur

- BOLIN, B.; KEELING, C.D.
Large-scale atmospheric mixing as deduced from seasonal and meridional variations of carbon dioxide. J. Geophys. Res. 68 (1963), S. 3899–3920.
- BOLIN, B.
Changes of a land biota and their importance for the carbon cycle. Science 196 (1977) S. 613–615.

BROECKER, W.S. u.a.

The fate of fossil fuel CO₂: Can the global carbon budget be balanced? Preprints of papers distributed by the authors (1978).

CALLENDAR, G.S.

On the amount of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus* 10 (1958) S. 243–248.

FLOHN, H.

Stehen wir vor einer Klimakatastrophe? UMSCHAU 77 (1977), S. 561–569.

FREYER, H.D.

Preliminary evaluation of the past CO₂-increase, as derived from ¹³C measurements in tree rings. Vortrag auf dem IASA/WMO-Workshop on Carbon Dioxide, Climate and Society, Februar 1978, Schloß Laxenburg, Österreich.

HAMPICKE, U.

Das CO₂-Risiko. UMSCHAU 77 (1977) S. 599–606.

HOLLAND, H.D.

The chemistry and chemical evolution of the atmosphere and oceans. Amsterdam: Elsevier 1977

MANABE, S.; WETHERALD, R.

The effects of doubling the CO₂ concentration of the climate of a general circulation model. *J. Atmosph. Sciences* 32 (1975) S. 3–15.

NEWELL, R.E.; WEARE, B.C.

A relationship between atmospheric carbon dioxide and pacific sea surface temperature. *Geophys. Res. Letters* 4 (1977), 1–2.

SIEGENTHALER, U.; OESCHGER, H.

Predicting future atmospheric CO₂ levels. *Science* 199 (1978) S. 388–394.

WOODWELL, G.M. u.a.

The biota and the world carbon budget. *Science* 199 (1978) S. 141–146.

ZIMEN, K.E.; OFFERMANN, P.; HARTMANN, G.

Source functions of CO₂ and future CO₂ burden in the atmosphere. *Z. Naturforschung* 32a (1977) S. 1544–1554.

3 A. BAUMGARTNER, M. KIRCHNER und H. MAYER, München

Die Wirkungen von potentiellen anthropogenen Veränderungen der Erdoberflächenbedeckung auf die weltweite Verteilung der Oberflächenalbedo, des Rauigkeitsparameters und anderer wichtiger Parameter des Impulsaustausches an der Grenzfläche der Erde und der Atmosphäre

Inhaltsübersicht

- 1 Einleitung
- 2 Oberflächenalbedo
- 3 Rauigkeitsparameter
- 4 Schubspannung am Boden und weitere Impulsparameter
- 5 Schlußbemerkung

1 Einleitung

Im größten geschlossenen Waldgebiet der Erde, in den brasilianischen Urwäldern, knicken täglich Tausende von Bäumen unter dem Lärm von Motorsägen und Bulldozern um. Auf den meist kargen Lateritböden Amazoniens zeichnet sich schon jetzt durch Nährstoffauswaschung und Erodierung eine ökologische Katastrophe ab. Wenn die Gewinnung von Agrarland durch Rodung im gleichen Umfang wie bis jetzt fortgesetzt werde, so wird oft behauptet, ließen sich Einflüsse auf das Regional-, ja selbst auf das Globalklima nicht mehr ausschließen, d.h. es würden Klimaänderungen auftreten, die ein größeres Ausmaß annehmen könnten als die Effekte, welche durch die natürliche Variabilität des Klimas bedingt seien. Studien von Molion (1975) und

POTTER et al. (1975), die sich mit der Rodung der tropischen Wälder befassen, geben erste Anhaltspunkte über die Größenordnung einer solchen, von Menschen ausgelösten Klimaänderung. Bis zur Erreichung des Fernziels, nämlich der richtigen Einschätzung und genauen Überwachung der anthropogenen Prozesse wie Landnutzung, die das Klima zu modifizieren imstande sind, ist noch ein weiter Weg; die größten Probleme bestehen derzeit in der Entwicklung geeigneter Klimamodelle und der Beschaffung der dafür notwendigen Eingangsdaten.

Als Beitrag für die Wirkung von anthropogenen Erdoberflächenveränderungen auf "Klimakenngrößen" können die im folgenden beschriebenen Untersuchungen angesehen werden, die am Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München durchgeführt wurden.

Ausgehend von der von BAUMGARTNER, MAYER und METZ (1976) und BAUMGARTNER und MAYER (1977) erstellten aktuellen globalen Verteilung einiger grundlegender klimatologischer Parameter für die Grenzfläche zwischen der Erde und der Atmosphäre wurde untersucht, wie diese Parameter auf weltweite, durch Menschen in Gang gebrachte Veränderungen der Erdoberflächenbedeckung reagieren (KIRCHNER, 1977).

Im einzelnen wurde in drei getrennten, sogenannten Simulationen dargelegt, welchen Änderungen die Oberflächenalbedo, der Rauhigkeitsparameter und verschiedene andere Impulsparameter, wie z.B. die Schubspannung am Boden, unterworfen sind, wenn

- a) alle Wälder gerodet und in Grün- bzw. Grasland umgewandelt werden.
- b) alle Wüsten in landwirtschaftlich nutzbare Gebiete verändert werden — sozusagen als bonifizierende Maßnahme im Kampf gegen die Nahrungsmittelknappheit, wobei jedoch in den ariden und semiariden Gebieten der Erde zur Zeit noch der Verhinderung der weiteren Degradation des ökologischen Systems das Hauptinteresse gewidmet sein dürfte —,
- c) die polaren Eisflächen auf der jeweils der Sonne abgewandten Erdhalbkugel anwachsen; dabei wurde angenommen, daß im Winter auf der Nordhalbkugel das Eis von der Arktis bis zur jetzigen nördlichen Treibeisgrenze vordringt und im Sommer auf der Südhalbkugel die antarktische Eisdecke bis zur geographischen Breite von 57,5° S reicht.

2 Oberflächenalbedo

Die klimatologische Bedeutung der Oberflächenalbedo (= surface albedo) a) liegt in erster Linie in der Tatsache, daß das Reflexionsvermögen an der Erdoberfläche eine strenge Korrelation mit der planetarischen Albedo, d.h. den Reflexionseigenschaften der Obergrenze der Atmosphäre besitzt. Änderungen der Oberflächenalbedo müssen sich so auf die Strahlungsbilanz des gesamten Systems Erde/Atmosphäre auswirken. Die Tabelle 1 zeigt, in wel-

chem Bereich die Oberflächenalbedo für verschiedene Erdoberflächenbedeckungen variiert.

Tabelle 1: Größenordnungen der Oberflächenalbedo (in %) für verschiedene Erdoberflächenbedeckungen

Erdoberflächenbedeckung	Oberflächenalbedo
Trop. Regenwald	12-16 (14)
Bor. Nadelwald	So: 12-14 (13) Wi: 38-48 (43)
Laubwald	So: 13-17 (15) Wi: 34-40 (37)
Savanne	Regenzeit: 16-20 (18) Trockenzeit: 21-25 (23)
Tundra	So: 16-20 (18) Wi: 60-80 (70)
Grünland (Wiese, Getreidefläche)	So: 18-22 (20) Wi: 45-59 (52)
Wasserflächen	6-30 je nach Sonnenhöhe
Eis	Wi: 70-90 (80) So: 45-55 (50)
Großstadt	So: 10-30 Wi: 20-50
Wüste	28-34 (31)

(Mittelwerte in Klammern)

Die am Institut für Meteorologie der Forstlichen Forschungsanstalt München in einem 5-Grad-Gitternetz vorhandene derzeitige weltweite Vegetationsverteilung wurde nun von BAUMGARTNER, MAYER und METZ (1976) mit dem für jede Erdoberflächenbedeckung charakteristischen Meßwert der Oberflächenalbedo verknüpft. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Abhängigkeit der Oberflächenalbedo von Sonnenhöhe, Trübung der bodennahen Luftschichten und Feuchtegehalt der Bodendecken unberücksichtigt blieb und nur ein mittlerer Wert angenommen wurde. Hingegen konnte über Wasserflächen der einfachen Gesetzmäßigkeit zwischen Oberflächenalbedo und geographischer Breite Rechnung getragen werden.

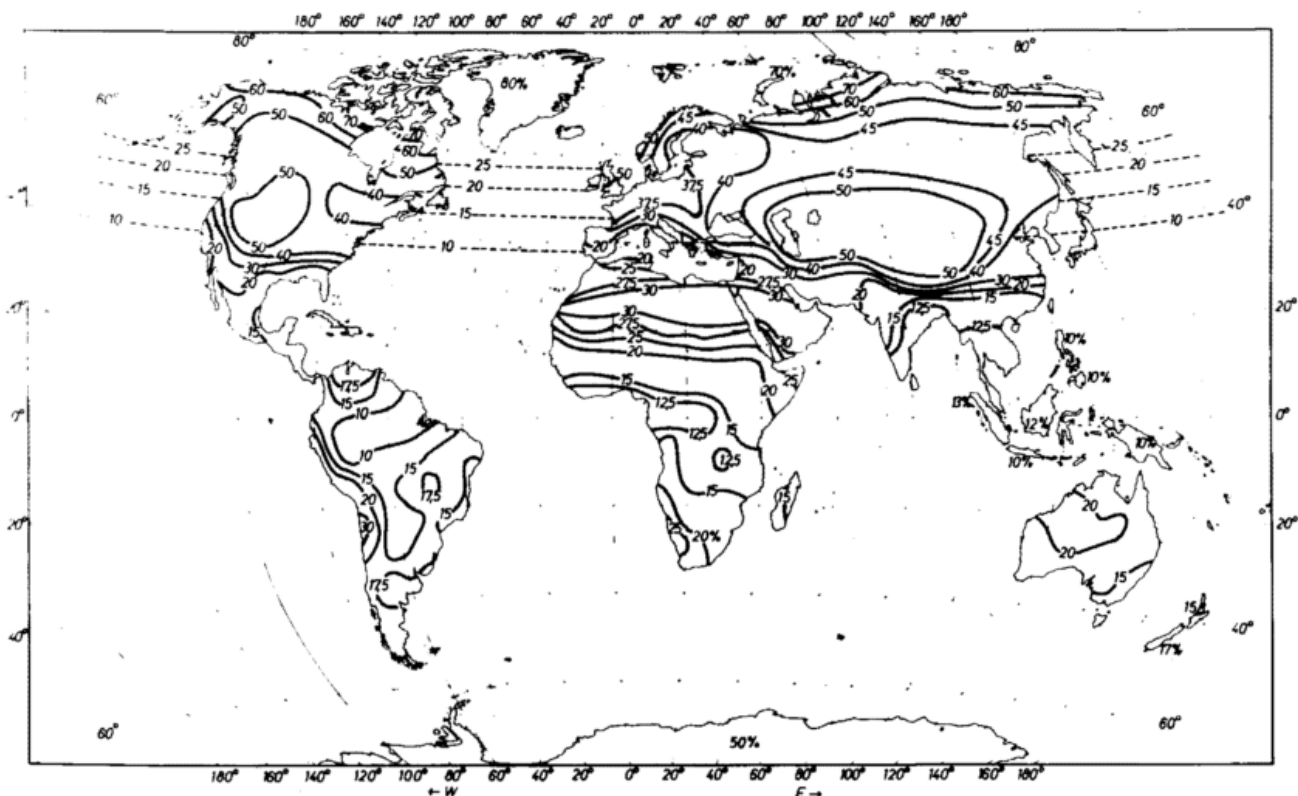


Abb. 1: Globale Verteilung der Oberflächenalbedo auf der Erde bei aktueller Erdoberflächenbedeckung im Januar — aus BAUMGARTNER, MAYER und METZ (1976)

Entsprechend der in den einzelnen Gitterquadraten vorkommenden Erdoberflächenbedeckungen ist unter Berücksichtigung ihrer Flächenanteile für jeden Gitterpunkt ein Albedowert berechnet worden. Dieses Verfahren wurde sowohl für die aktuelle Erdoberflächenbedeckung als auch für die drei Simulationen angewendet. So war es möglich, Weltkarten mit der mittleren Verteilung der Oberflächen-

albedo a im Januar, Juli und Jahr zu erstellen (BAUMGARTNER, MAYER und METZ, 1976; KIRCHNER, 1977). Vergleicht man diese Darstellungen bei aktueller Vegetationsverteilung mit den Weltkarten anderer Autoren (z. B. KUNG, et. al., 1964; POSEY und CLAPP, 1964) so zeigt sich eine weitgehende Übereinstimmung.

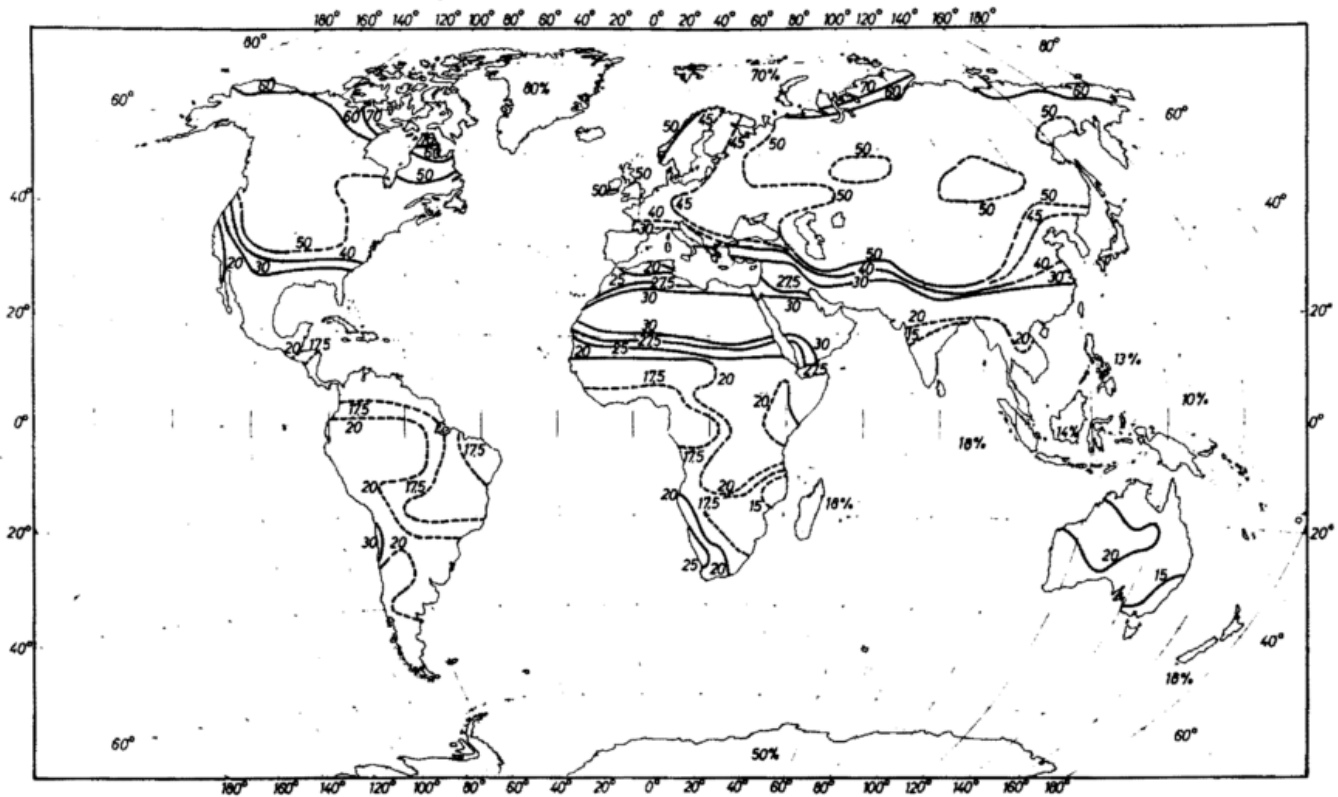


Abb. 2: Globale Verteilung der Oberflächenalbedo auf der Erde bei der Simulation "Wälder zu Grünland" im Januar – aus KIRCHNER (1977)

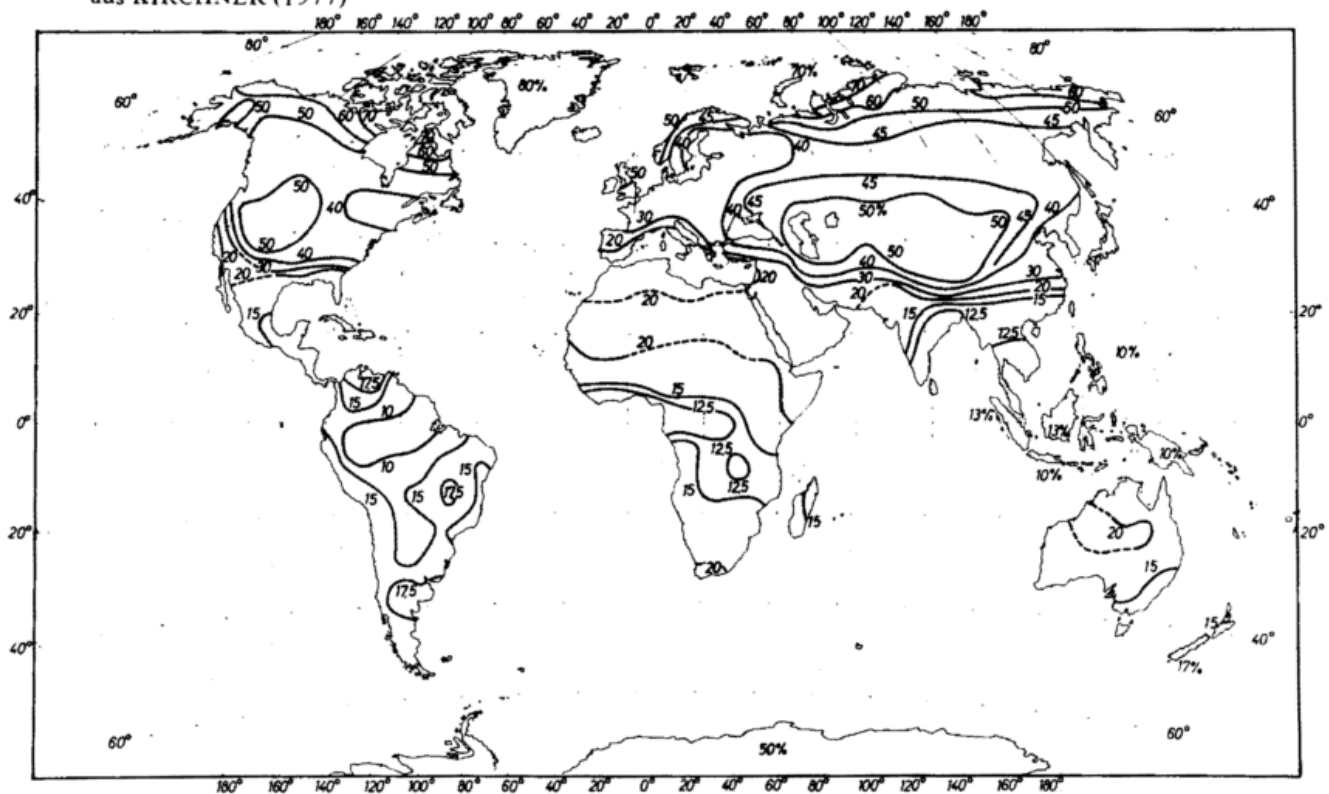


Abb. 3: Globale Verteilung der Oberflächenalbedo auf der Erde bei der Simulation "Wüsten zu Grünland" im Januar – aus KIRCHNER (1977)

Als Auszug aus den obigen Ergebnissen stellt Abb. 1 (S. 33) die Weltkarte von a für den Monat Januar dar, die auf Grund der aktuellen Vegetationsverteilung erstellt wurde. In Abb. 2 (S. 34) sind durch die gestrichelten Isolinien die Änderungen beschrieben, die sich nach der potentiellen Umwandlung der Wälder in Grünland einstellen würden. Eine dritte Weltkarte (Abb. 3) gibt einen Überblick über die globale Verteilung der Oberflächenalbedo im Januar für die utopisch erscheinende Möglichkeit, daß alle Wüstengebiete bewässert und in landwirtschaftlich genutzte Flächen (Grünland) verwandelt werden. Die Änderungen im Vergleich zur aktuellen Erdoberflächenbedeckung sind wieder durch gestrichelte Isolinien angedeutet. Die Karteninhalte bedürfen hier keiner näheren Erläuterung; vielmehr sei hierzu auf die oben genannten Veröffentlichungen verwiesen.

Aus den Einzelwerten der globalen Verteilungen war es möglich, zonale Mittelwerte der Oberflächenalbedo zu berechnen. Bei BAUMGARTNER, MAYER und METZ (1976) wurde zunächst zwischen Land- und Meeresflächen unterschieden und anschließend eine zonale Verteilung für die gesamte Erde erarbeitet. Diese ist für Januar, Juli und das Jahr – bei aktueller Erdoberflächenbedeckung – aus Abbildung 4 ersichtlich.

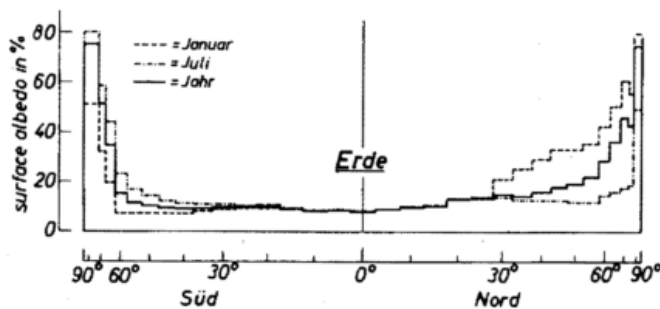


Abb. 4: Zonale Mittelwerte der Oberflächenalbedo auf der Erde im Januar, Juli und Jahr – aus BAUMGARTNER, MAYER und METZ (1976)

Tabelle 2 enthält die zonalen Änderungen der Oberflächenalbedo im Juli für den Fall aller drei angedeuteten Simulationen; dabei ist ein Globalwert enthalten, der aus der Mittelung aller zonalen Mittelwerte unter Berücksichtigung des prozentualen Anteils der einzelnen Flächenzonen, bezogen auf die Äquatorialzone zwischen $2,5^\circ$ N und $2,5^\circ$ S, berechnet wurde.

Aus dem Tabellenanhang bei KIRCHNER (1977) ist zu entnehmen, daß sich im Juli der Globalwert der Oberflächenalbedo a , der bei aktueller Erdoberflächenbedeckung 15,4% beträgt, für den Fall eines massiven Eisausbruchs von der Antarktis aus um 2,3% erhöhen würde. Bei Rodung aller Wälder würde für a ein Wert von 15,8% (Zunahme 0,4%) berechnet, während sich bei der Bepflanzung der Wüsten für a eine Abnahme von 0,5% ergab. Diese Änderungen des globalen Werts der Oberflächenalbedo erscheinen auf den ersten Blick als relativ gering. Es darf dabei aber nicht vergessen werden, daß durch anthropogene Einflüsse auf begrenzte Gebiete der Erde dort recht erhebliche Änderungen bezüglich der Oberflächenalbedo festgestellt worden sind (OTTERMANN, 1977). Außerdem existieren bisher noch keine Angaben darüber, um welchen – kleinen oder großen – Betrag sich die Oberflächenalbedo ändern muß, damit sie mit zu Klimaänderungen beitragen kann.

Tab. 2: Zonale und globale Mittelwerte der Oberflächenalbedo bei aktueller und simulierter Erdoberflächenbedeckung im Südwinter (Juli)

geograph. Breite	aktuell %	Eis rückt vor %	Wälder → Grasland %	Wüsten → Grasland %
85°N	50,0	50,0	50,0	50,0
80°N	50,0	50,0	50,0	50,0
75°N	19,8	19,8	19,9	19,8
70°N	18,2	18,2	18,9	18,2
65°N	16,8	16,8	19,7	16,8
60°N	15,0	15,0	17,5	15,0
55°N	12,4	12,4	14,2	12,4
50°N	12,4	12,4	13,8	12,4
45°N	13,5	13,5	14,3	13,1
40°N	13,2	13,2	13,7	12,9
35°N	13,2	13,2	13,4	12,1
30°N	14,1	14,1	14,6	11,8
25°N	13,5	13,5	14,2	10,6
20°N	13,2	13,2	13,8	11,2
15°N	10,9	10,9	11,2	10,4
10°N	10,4	10,4	10,7	10,2
5°N	9,2	9,2	9,9	9,2
0°	8,2	8,2	9,1	8,2
5°S	9,0	9,0	9,8	8,9
10°S	8,7	8,7	9,3	8,4
15°S	9,7	9,7	9,8	9,3
20°S	10,9	10,9	10,9	10,3
25°S	10,5	10,5	10,8	9,8
30°S	11,1	11,1	11,2	10,6
35°S	11,0	11,0	11,0	10,9
40°S	11,6	11,6	11,6	11,6
45°S	12,3	12,3	12,3	12,3
50°S	14,1	14,1	14,1	14,1
55°S	17,0	17,0	17,0	17,0
60°S	23,0	80,0	23,0	23,0
65°S	44,0	80,0	44,0	44,0
70°S	58,5	80,0	58,5	58,5
75°S	80,0	80,0	80,0	80,0
80°S	80,0	80,0	80,0	80,0
85°S	80,0	80,0	80,0	80,0
global	15,4	17,7	15,8	14,9

3 Rauigkeitsparameter

Die energetischen und aerodynamischen Eigenschaften der Erdoberfläche spielen eine beachtliche Rolle bei der Zirkulation der Atmosphäre. Ein vorgegebener Gradientwind kann sich so in Gegenden mit unterschiedlichen Bodenrauigkeiten teilweise sehr verschieden auswirken. Wenn z.B. Luftmassen gegen die Küstenlinie anströmen, müssen sie durch die erhöhte Rauigkeit der festen Erde eine mit einer Richtungsänderung verbundene Abbremsung erfahren. In zumindest abgeschwächter Form sind entsprechende Effekte auch denkbar, wenn die Erdoberflächenbedeckung, d.h. die untere Randbedingung für atmosphärische Vorgänge, durch die Menschen modifiziert wird. Hierzu zählt in erster Linie die Rodung der Wälder als eine die Erdoberfläche "glättende" Maßnahme. Der umgekehrte Fall einer "Aufrauhung" der Landschaft liegt bei der Bepflanzung von Wüstengebieten und bei der Errichtung

von Siedlungen und Städten vor. In diesem Fall kann zudem wie bei einer vom Meer auf das Festland gerichteten Strömung die höhere Reibung über den bepflanzten Gebieten zu einer horizontalen Strömungskonvergenz führen; diese ist mit aufsteigender Luftbewegung und einer Zunahme der Bereitschaft zur Niederschlagsbildung verbunden.

Die aerodynamischen Eigenschaften der verschiedenen Erdoberflächen können durch den Rauigkeitsparameter z_0 charakterisiert werden. Über einer Vegetation ist z_0 bei adiabatisch geschichteter Atmosphäre durch den logarithmischen Ansatz für das vertikale Windprofil definiert:

$$u(z) = \frac{u_x}{k} \ln \left(\frac{z - d + z_0}{z_0} \right)$$

wobei $u(z)$ die horizontale Windgeschwindigkeit in der Höhe z , u_x die Schubspannungsgeschwindigkeit, k die Kármánsche Konstante und d die Nullpunktverschiebung bedeuten. Zur Bestimmung von z_0 läßt sich eine Beziehung von STANHILL (1969) verwenden, die einen Zusammenhang zwischen z_0 und der Bestandshöhe h beschreibt:

$$\log z_0 = a \cdot \log h - b$$

Die Konstanten a und b wurden von BAUMGARTNER, MAYER und METZ (1977) aus Abbildung 5 zu $a = 1,03$ und $b = 0,86$ bestimmt. Grundlage der Abbildung 5 bildeten die in der Literatur (u.a. BAUMGARTNER, 1967; JEHLIE 1970; STANHILL, 1969; SUTTON, 1953; TANI et al., 1957) enthaltenen Meßwerte von z_0 in Abhängigkeit von h . Auf Grund der so erhaltenen Regressionsgeraden konnten auch für die Vegetationen, für die keine z_0 -Meßdaten vorlagen, die Werte von z_0 ermittelt werden.

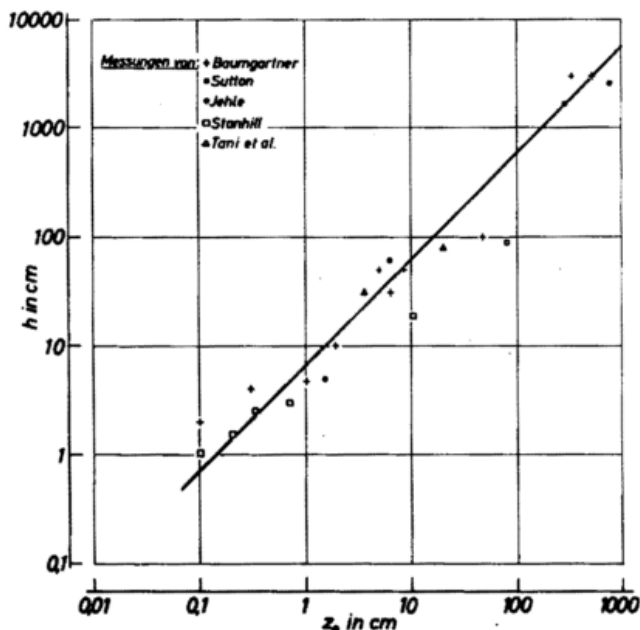


Abb. 5: Zusammenhang zwischen der Bestandshöhe h und dem Rauigkeitsparameter z_0 — aus BAUMGARTNER, MAYER und METZ (1977)

In Tabelle 3 sind hierzu die errechneten bzw. gemessenen z_0 -Werte für verschiedene Erdoberflächenbedeckungen angegeben. Dort zeigt sich beispielsweise, daß z_0 für Großstädte ebenfalls wie für Wälder zwischen 100 und 400 cm liegt.

Tab. 3: Rauigkeitsparameter z_0 (in cm) für verschiedene charakteristische Erdoberflächenbedeckungen

Wald:	100 – 400
Großstadt:	100 – 400
Getreide:	5 – 25
Grünland: Wiese:	1 – 10
Wüste:	< 1
Meer:	~ 0,01 (in Abhängigkeit von der Wellenhöhe)
Schneeflächen:	< 1
Eisflächen:	< 1

Bei der Erstellung von Weltkarten von z_0 konnte methodisch ebenso verfahren werden, wie es bei der Beschreibung der globalen Verteilung der Oberflächenalbedo bereits angedeutet worden war. Aus den Ergebnissen von BAUMGARTNER, MAYER und METZ (1977) sowie von KIRCHNER (1977) wurden hier als Beispiele in Abbildung 6 die globale Verteilung des Rauigkeitsparameters bei aktueller Erdoberflächenbedeckung und in Abbildung 7 bei der Simulation Wälder zu Grasland ausgewählt. In Abb. 8 (S. 38) ist weiterhin dargestellt, welche Änderungen für z_0 bei einer Bepflanzung aller Wüsten mit Getreide weltweit auftreten würden. Die gestrichelten Isolinien in den Abbildungen 7 und 8 stellen wie bei der Oberflächenalbedo die Änderungen im Vergleich zur aktuellen Erdoberflächenbedeckung dar.

Es muß angemerkt werden, daß das lineare Mittelungsverfahren, das bei der Berechnung des repräsentativen Wertes sowohl für die einzelnen Gitterquadrate als auch für die Zonalzonen im Falle der Oberflächenalbedo verwendet worden war, hinsichtlich des Rauigkeitsparameters z_0 keineswegs unproblematisch ist. Der Grund dafür ist im breiten Spektrum des Rauigkeitsparameters zu suchen, dessen Werte bei verschiedenen Erdoberflächenbedeckungen vier Zehnerpotenzen überstreichen können (s. Tab. 3). Trotz eines solchen linearen Mittelungsverfahrens läßt sich jedoch anhand der Weltkarten gut abschätzen, welchen Einfluß potentielle Landnutzung haben kann.

Aus KIRCHNER und MAYER (1977) ist dazu die Abbildung 9 (S. 38) entnommen worden, in der die zonalen Mittelwerte von z_0 auf der Erde bei aktueller Vegetationsverteilung und den Simulationen "Wälder zu Wiesen" eingetragen sind. Erwartungsgemäß wirkt sich auf die Zonalmittel von z_0 eine globale Rodung der Wälder stärker aus als die weltweite Bepflanzung der Wüsten mit Grasland. Die größten Unterschiede von z_0 bezüglich der jetzigen Verteilung hätte man hingegen z.B. bei der Schaffung von künstlichen Seen auf gerodetem Land oder der Errichtung von Städten in "ehemaligen" Wüstengebieten zu erwarten.

4 Schubspannung am Boden und weitere Impulsparameter

Nach LETTAU (1959) läßt sich mit Hilfe des Rauigkeitsparameters z_0 , des Betrages des geostrophischen Windes an der Erdoberfläche $|v_{g,0}|$, des Coriolisparameters f und der Luftdichte ρ eine Beziehung für die Bodenschubspannung

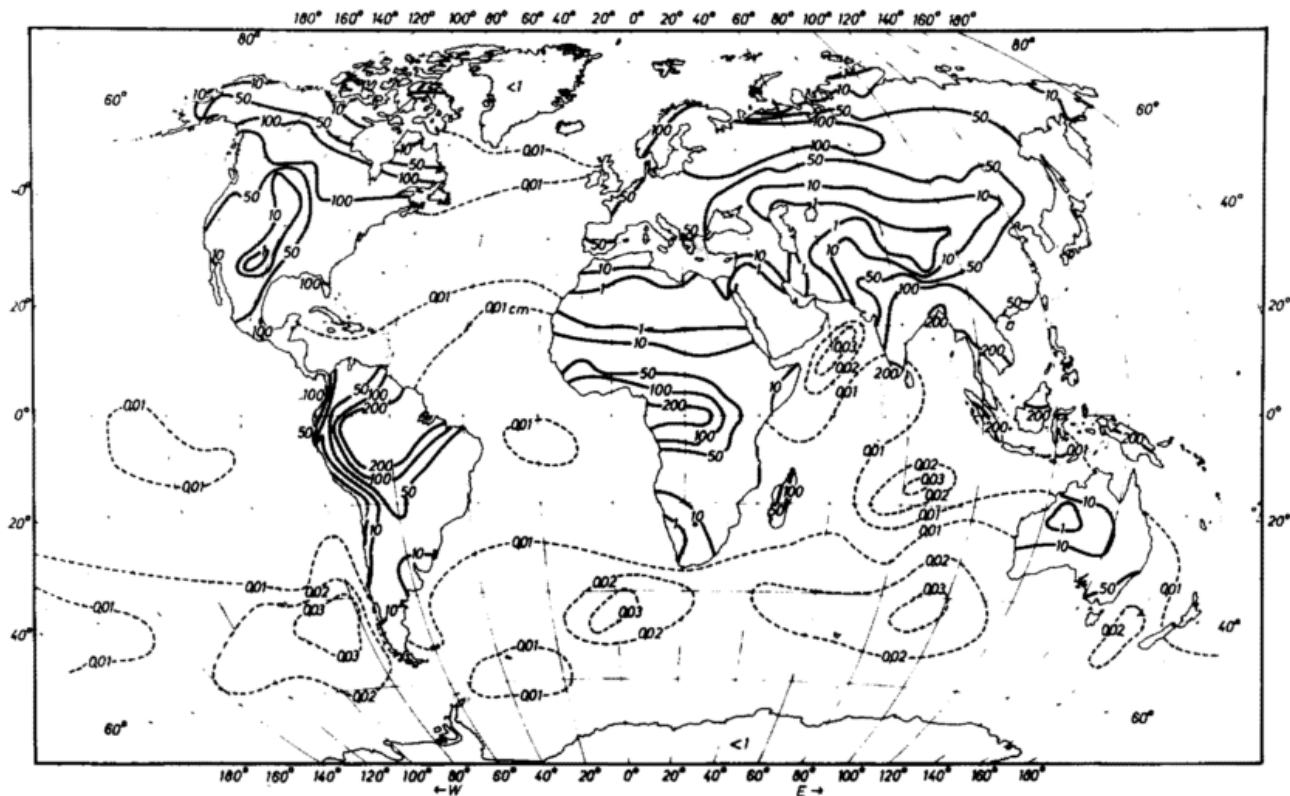


Abb. 6: Globale Verteilung des Rauigkeitsparameters auf der Erde bei aktueller Erdoberflächenbedeckung — aus BAUMGARTNER, MAYER und METZ (1977)

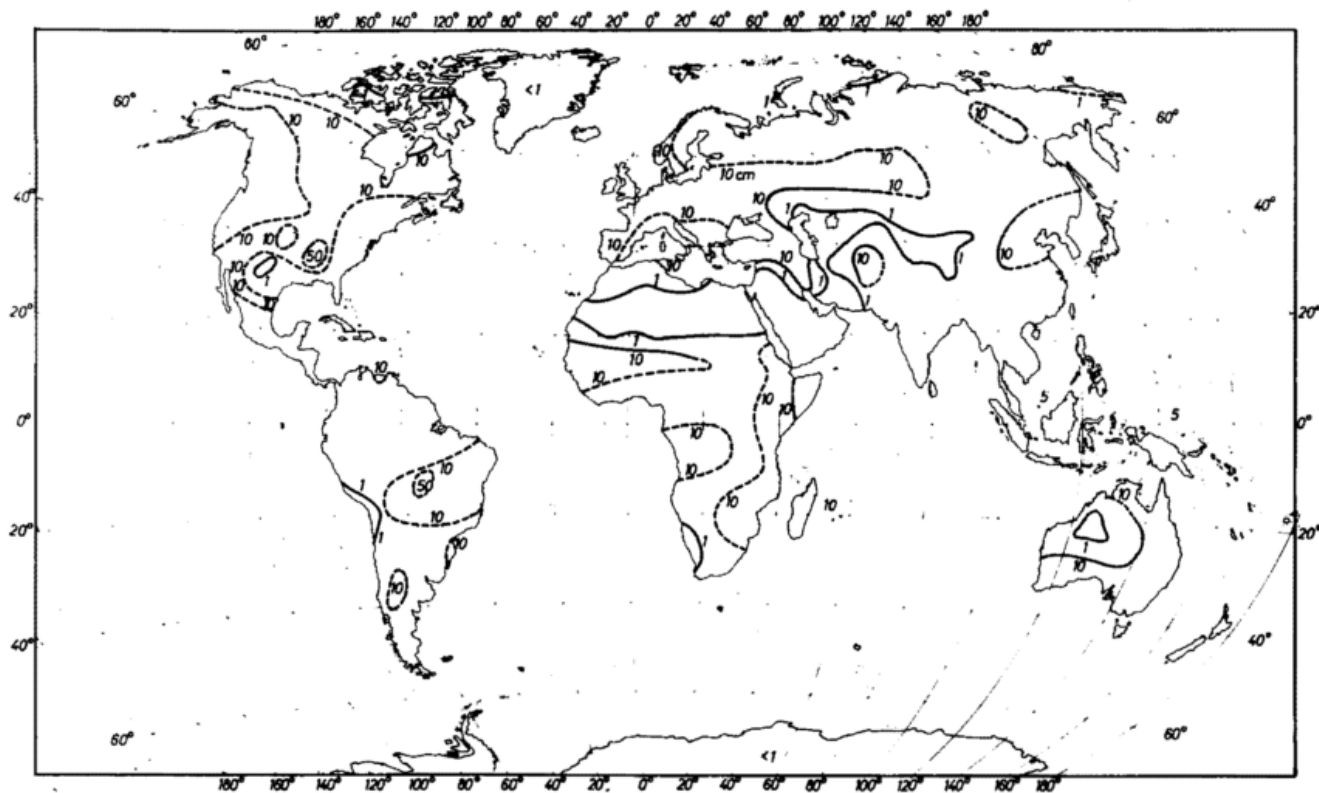


Abb. 7: Globale Verteilung des Rauigkeitsparameters auf der Erde bei der Simulation "Wälder zu Grasland" — aus KIRCHNER (1977)

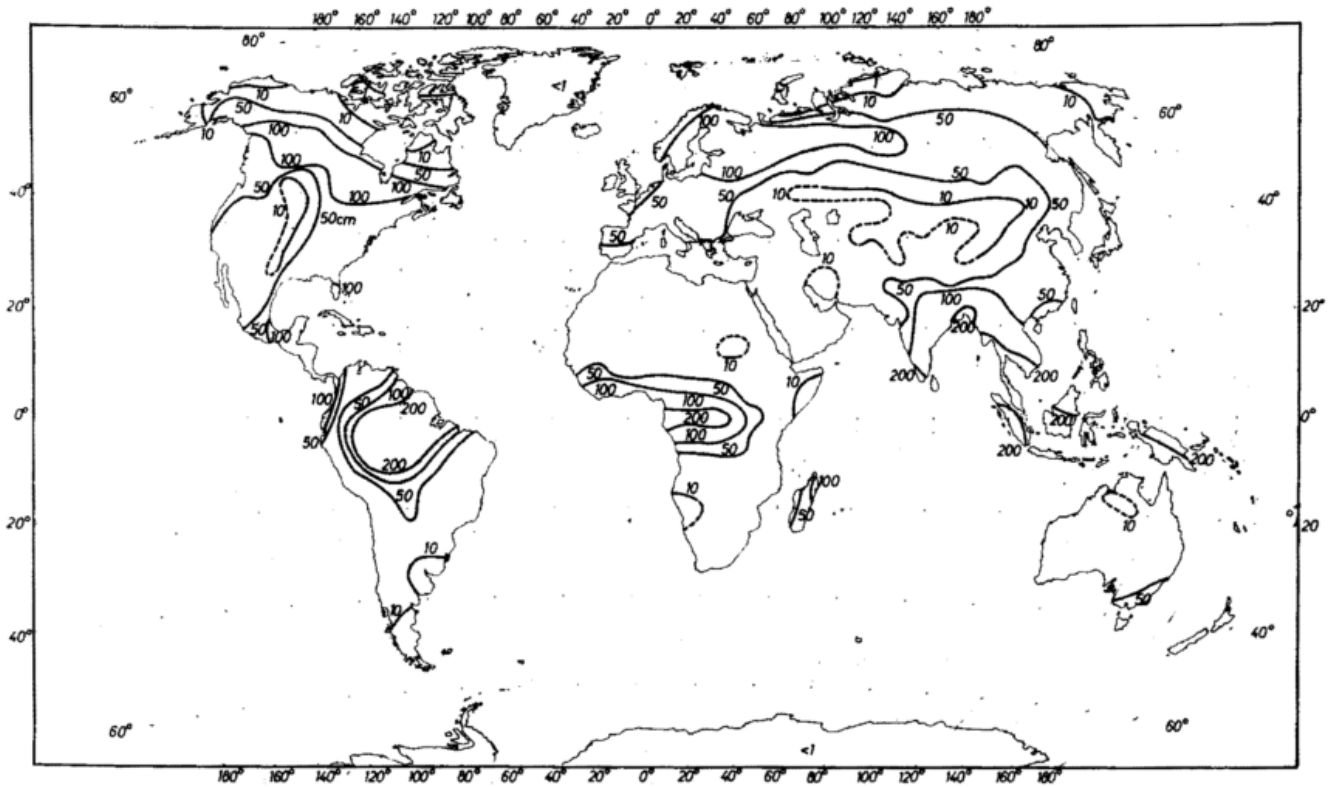
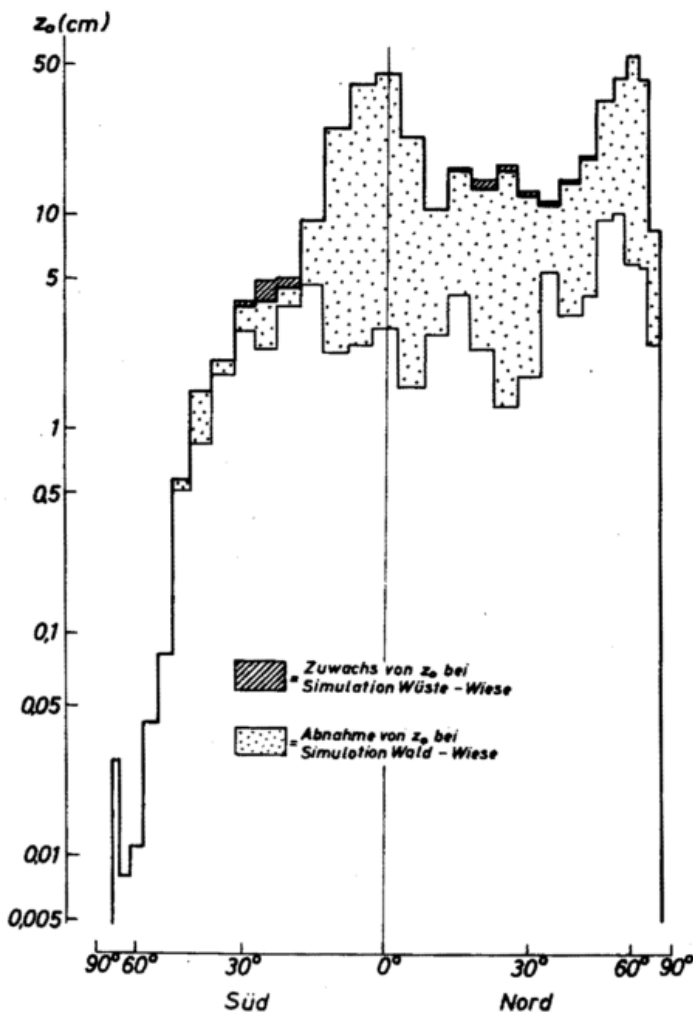


Abb. 8: Globale Verteilung des Rauigkeitsparameters auf der Erde bei der Simulation "Wüsten zu Getreidefelder" – aus KIRCHNER (1977)



τ_0 herleiten (Tab. 4, S. 40). Diese ist im Gegensatz zu z_0 geeignet, den Störeffekt von Hindernissen bzw. Bodenrauigkeiten auf Strömungen über Oberflächen zu beschreiben. Für die Bestimmung von $|v_{g,0}|$ wurden hier die Daten des Geopotentials ϕ von 850 mbar verwendet, die im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 in einem die Erde umspannenden Gitternetz von 5 Grad Maschenweite vorlagen; zusätzlich mußte angenommen werden, daß $|v_{g,0}| = |v_{g,850}|$ ist, weil keine andere Methode verfügbar war, nach der $|v_{g,0}|$ aus den vorhandenen Daten berechnet werden konnte. Aus dem Vergleich der Abbildungen 10 und 11, die jeweils exakt für Januar 1958 gültig sind, wird ersichtlich, welche Änderungen τ_0 erfährt, wenn alle Wälder auf der Erde gerodet und die so entstandenen Freiflächen in Grasland umgewandelt werden.

Abb. 9: Zonale Mittelwerte des Rauigkeitsparameters auf der Erde bei aktueller Erdoberflächenbedeckung und den Simulationen "Wälder zu Grasland (Wiesen)" bzw. "Wüsten zu Grasland (Wiesen)" – aus KIRCHNER und MAYER (1977).

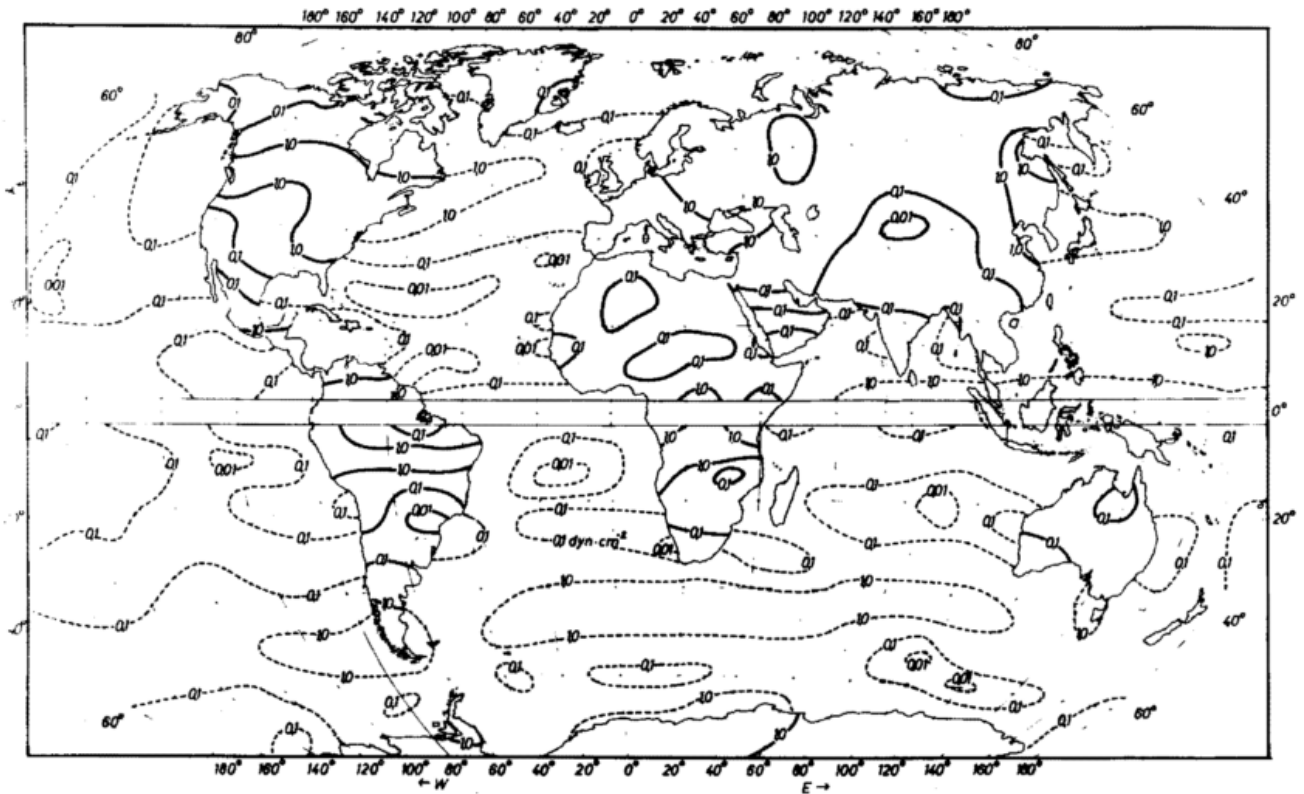


Abb. 10: Globale Verteilung der Schubspannung an der Erdoberfläche bei aktueller Erdoberflächenbedeckung im Januar (1958) – aus BAUMGARTNER und MAYER (1977)

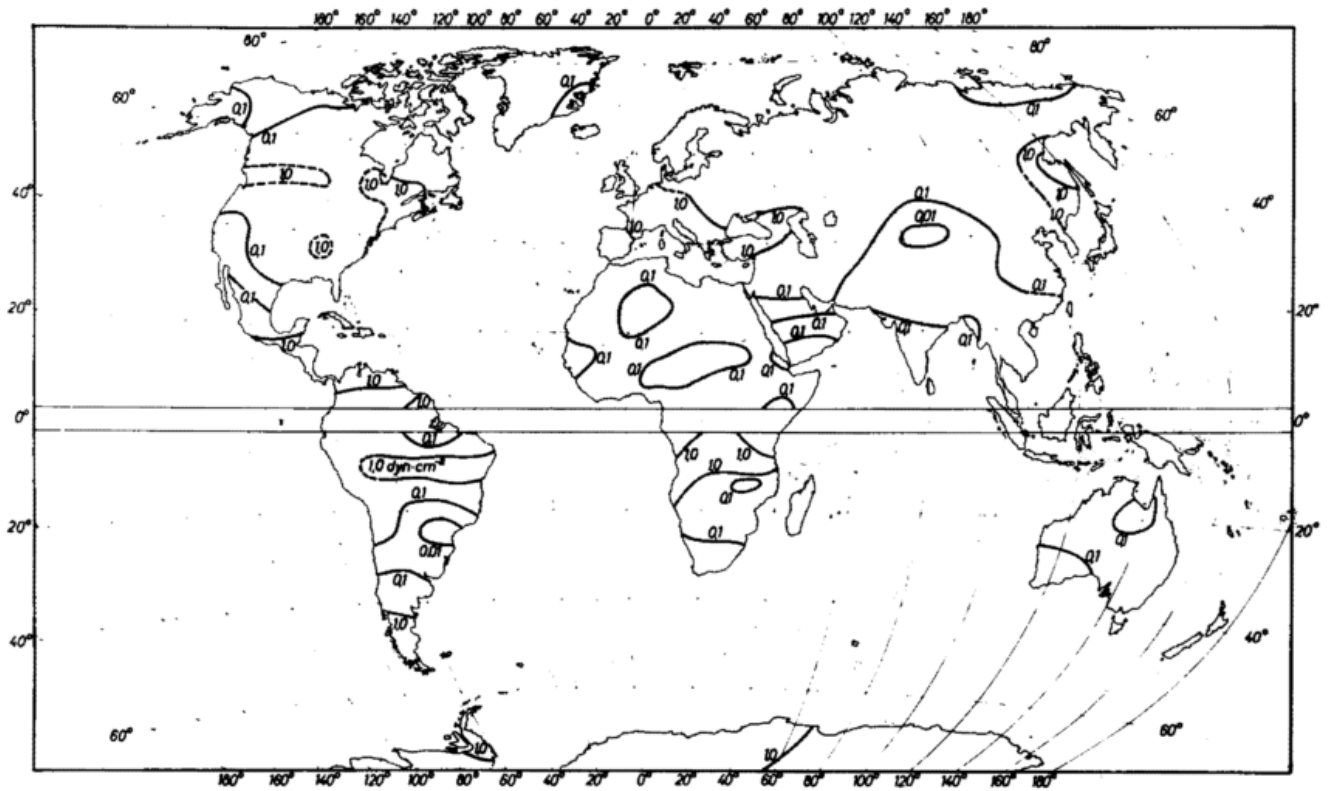


Abb. 11: Globale Verteilung der Schubspannung an der Erdoberfläche bei der Simulation "Wälder zu Grasland" im Januar (1958) – aus KIRCHNER (1977)

Tab. 4: Ableitung von Impulsparametern, nach LETTAU (1959), KUNG (1963) und WIPPERMANN (1972)

$$\text{Ablenkungswinkel } \alpha_0 : \alpha_0 = \frac{173.58}{\log Ro_0} - 3.03$$

Eingangsgrößen:

- Rauhigkeitsparameter z_0
- Betrag des geostrophischen Windes an der Erdoberfläche $w_{g,0}$
- Coriolisparameter f
- Luftdichte ρ
- Karmankonstante k

Energiedissipation an der Erdoberfläche E_0 :
 $E_0 = \rho \cdot u_x^2 \cdot w_{g,0} \cdot \cos \alpha_0$

Konstante M aus den Widerstandsgesetzen:
 $M = \ln(CD \cdot Ro_0) - \frac{k \cdot \cos(|\alpha_0|)}{CD}$

abgeleitete Größen:

“surface Rossby-number” Ro_0 : $Ro_0 = \frac{w_{g,0}}{f \cdot z_0}$

Konstante N aus den Widerstandsgesetzen:
 $N = \frac{k \cdot \sin(|\alpha_0|)}{CD}$

geostrophischer Reibungskoeffizient
 0,205

CD : $CD = \frac{0,205}{\log Ro_0 - 0,556}$

Schubspannungsgeschwindigkeit am Boden

$u_{x,0}$: $u_{x,0} = CD \cdot w_{g,0}$

Schubspannung am Boden

τ_0 : $\tau_0 = \rho \cdot u_x^2 = \rho \cdot (CD \cdot w_{g,0})^2$

Von z_0 kann außerdem noch eine Reihe von anderen Impulsparametern abgeleitet werden (s. Tab. 4), von denen hier als Beispiel noch der Ablenkungswinkel α_0 betrachtet wird. Für ihn – als dem Winkel zwischen der Richtung der Schubspannung am Boden und den Isobaren – sind die weltweiten Änderungen zwischen der aktuellen Erdoberflächenbedeckung und der Simulation “Wälder zu Grasland”, jeweils exakt bezogen auf den Januar 1958, aus den Abbildungen 12 und 13 zu entnehmen. Dabei geben in Abbildung 13 die gestrichelten Isolinien auf den Festlandsflächen ebenfalls die durch die Simulation hervorgerufenen Änderungen bei α_0 an.

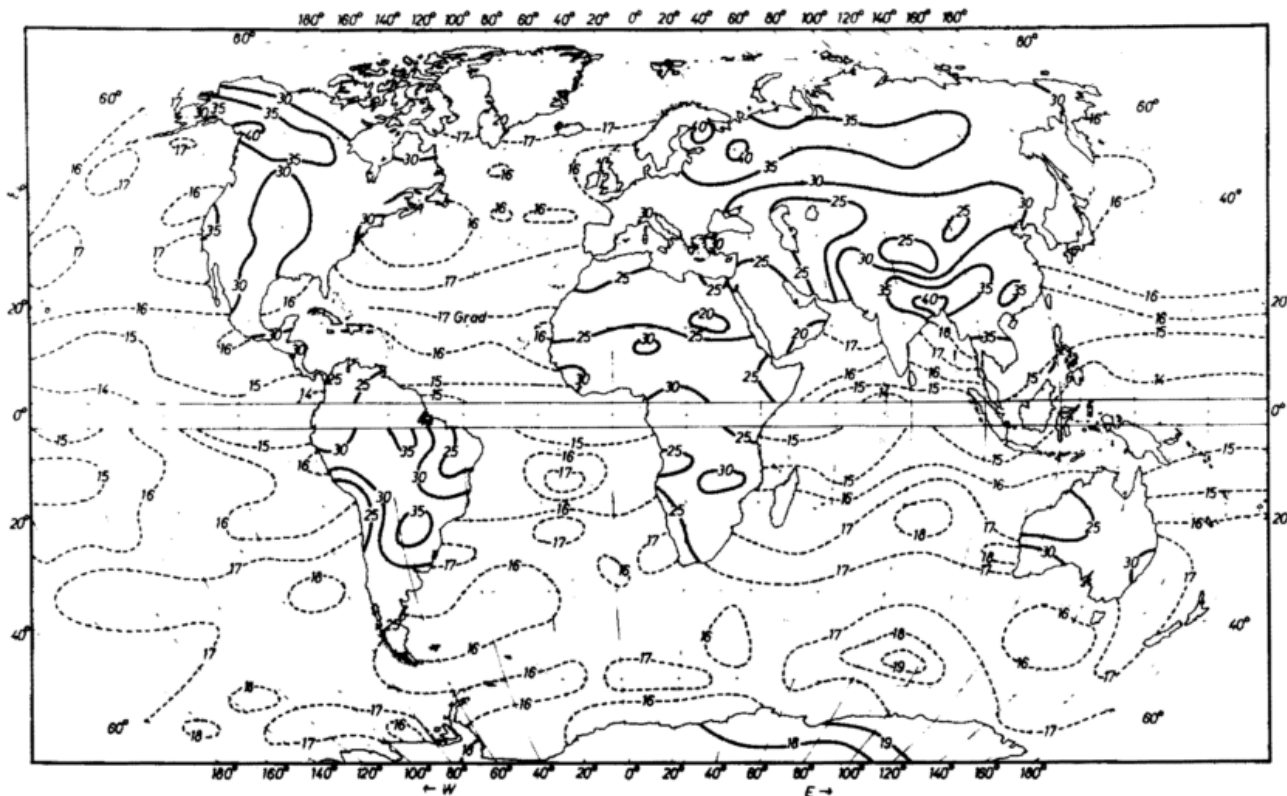


Abb. 12: Globale Verteilung des Ablenkungswinkels an der Erdoberfläche bei aktueller Erdoberflächenbedeckung im Januar (1958) – aus BAUMGARTNER und MAYER (1977)

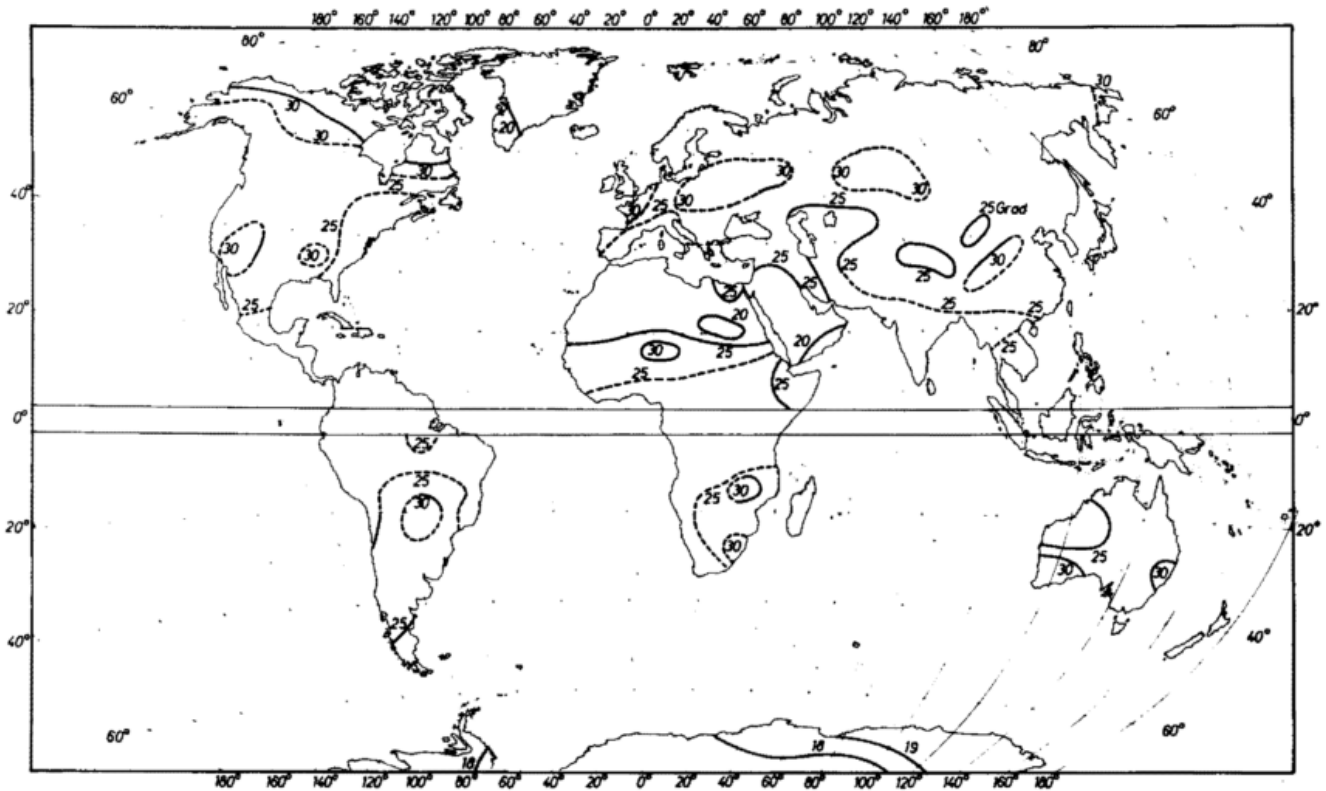


Abb. 13: Globale Verteilung des Ablenkungswinkels an der Erdoberfläche bei der Simulation "Wälder zu Grasland" im Januar (1958) – aus KIRCHNER (1977)

5 Schlußbemerkung

In Zusammenhang mit den in der Literatur enthaltenen Angaben über den Energie- und den Wasserhaushalt, den Untersuchungen, die in dieser Arbeit kurz beschrieben worden sind, und ähnlichen Überlegungen für die Parameter, die den Austausch von Strahlung, Impuls, Wärme und Wasserdampf im wesentlichen kennzeichnen, können klimatische Folgen von anthropogenen Veränderungen der aktuellen Erdoberflächenbedeckungen diskutiert werden. Man sollte dabei jedoch dringend von Schlußfolgerungen Abstand nehmen, die größtenteils im Rahmen der Spekulation liegen und die nicht selten in der – meistens populärwissenschaftlichen – Literatur zu finden sind. Erst die Entwicklung von mathematisch-physikalischen Klimamodellen, die die wichtigsten physikalischen Gesetze in der Atmosphäre, und insbesondere in der atmosphärischen Grenzschicht, berücksichtigen, kann hier wesentliche Abhilfe schaffen und zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen.

Literatur

BAUMGARTNER, A.

Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung aus Messungen des vertikalen Wasserdampfaustausches und der Energiebilanz. Sonderheft Dtsch. Gewässerkd. Mitt. (1967) S. 192–195.

BAUMGARTNER, A.; MAYER, H.; METZ, W.

Globale Verteilung der "Oberflächenalbedo". Meteorol. Rdsch. 29 (1976) S. 38–43.

BAUMGARTNER, A.; MAYER, H.; METZ, W.;

Weltweite Verteilung des Rauigkeitsparameters z_0 mit Anwendung auf die Energiedissipation an der Erdoberfläche. Meteorol. Rdsch. 30 (1977) S. 43–48.

BAUMGARTNER, A.; MAYER, H.

Weltkarten von Parametern des Impulsaustausches. Meteorol. Rdsch. 30 (1977) S. 176–185.

JEHLE, A.

Die Parameter des vertikalen logarithmischen Windprofils über verschiedenen Pflanzenbeständen. Diplomarbeit Meteorol. Inst. Univ. München 1970.

KIRCHNER, M.

Anthropogene Einflüsse auf die Oberflächenalbedo und die Parameter des Austausches an der Grenze Erde/Atmosphäre. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München Nr. 31 (1977).

KIRCHNER, M.; MAYER, H.

Potentielle anthropogene Einflüsse auf die globale Verteilung der Oberflächenalbedo und des Rauigkeitsparameters. Ann. Meteorol. (NF) Nr. 12 (1977) S. 72–75.

KUNG, E.C.

Climatology of aerodynamic roughness parameter and energy dissipation in the planetary boundary layer over the Northern Hemisphere. Ann. Rep. Univ. Wisconsin, Dep. Meteorol. (1963) S. 37–96.

KUNG, E.C.; BRYSON, R.A.; LENSCHOW, D.H.

Study of a continental surface albedo on the basis of flight measurements and structure of the Earth's surface cover over North America. Monthly Weather Rev. 92 (1964) S. 543–564.

LETTAU, H.H.

Wind profile, surface stress and geostrophic drag coefficients in the atmospheric surface layer. *Adv. Geophys.* 6 (1959) S. 241–257.

MOLION, L.C.

A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas Basin with considerations of deforestation effects. PH Thesis. Univ. Wisconsin 1975.

OTTERMAN, J.

Anthropogenic impact on the albedo on the Earth. *Climatic Change* 1 (1977), S. 137–155.

POSEY, J.W.; CLAPP, P.F.

Global distribution of normal surface albedo. *Geofis. Internac.* 4 (1964) S. 33–48.

POTTER, G.L.; ELLSÄSSER, H.W.; MACCRACKEN, M.C.; LUTHER, F.M.

Possible climatic impact of tropical deforestation. *Nature* 258 (1975) S. 697–698.

STANHILL, G.

A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux. *J. appl. Meteorol.* 8 (1969) S. 509–513.

SUTTON, O.G.

Micrometeorology. New York: McGraw Hill 1953.

TANI, N.; INOUE, E.; IMAI, K.

Some measurements of wind over the cultivated field. *J. agric. Meteorol.* 12 (1957) S. 17–20.

WIPPERMANN, F.

Empirische Formeln für die universellen Funktionen $M_m(\mu)$ und $N(\mu)$ im Widerstandsgesetz einer barotropen und diabatischen planetarischen Grenzschicht. *Beitr. Phys. Atm.* 45 (1972) S. 305–311.

Aus dem Deutschen Wetterdienst

Am 4. November 1977 wurde im Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes die Erweiterte Automatische Fernmeldespeichervermittlung offiziell in Betrieb genommen. Der Leiter der Abteilung Fernmeldedienst, Dipl.-Ing.

BOPP, gab bei dieser Gelegenheit einen kurzen Überblick über die Entwicklung des Wetterfernmeldewesens und über die Leistungsfähigkeit der neuen Anlage im Blick auf zukünftige Aufgaben.

Wetterfernmeldedienst — für die Zukunft gerüstet

Die Tradition des Wetterfernmeldedienstes reicht weit in die Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg zurück. Mit den nach dem heutigen Sprachgebrauch konventionellen Methoden Funk- und Drahttelegraphie wurden Wettermeldungen transportiert. Anfang der sechziger Jahre rief die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) die Wetterwacht ins Leben, deren Aufgabe es ist, diesen Austausch von Wetterinformationen weltweit auf eine neue Basis zu stellen. Anfang 1966 gab es die ersten internationalen Diskussionen über Möglichkeiten für den Einsatz von modernen Technologien im Wetterfernmeldedienst. Bereits 1967 hat der Deutsche Wetterdienst (DWD), der schon seit langem eine Wetterfernmeldezentrale von internationalem Rang betrieb, den Auftrag für eine Automatische Fernmeldespeichervermittlung erteilt. Sie sollte in der Lage sein, neben den herkömmlichen Fernschreibleitungen auch den Verkehr über moderne Datenleitungen zu ermöglichen und die Speicherung von Wetterinformationen

für Fernmeldezwecke in dem damals geforderten Umfang vorzunehmen. Der erste Auftrag wurde 1967 an AEG-Telefunken erteilt. In den Jahren 1968 bis 1972 gab es eine Testphase, in der der DWD zusammen mit anderen internationalen Zentralen versuchte, ein europäisches Datennetz nach den Empfehlungen der WMO aufzubauen. 1973 wurde mit der ersten Anlage der Betriebsdienst aufgenommen. In den folgenden Jahren bis 1976 folgte die Inbetriebnahme anderer Zentralen in Europa und auf der ganzen Welt. Die automatische Fernmeldespeichervermittlung des DWD ist heute mit elf internationalen Zentralen verbunden. In diesen Zentralen arbeiten Rechnersysteme der Firmen CEI in Frankreich, MARCONI in England, UNIVAC in Schweden, CDC in der Tschechoslowakei und in Österreich, IBM in Italien und SIEMENS in der Schweiz. Europaweit ist die Wetterfernmeldezentrale des DWD verbunden mit dem Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen, mit

EUROCONTROL und mit der Europäischen Raumfahrtorganisation. National bestehen Verbindungen zur Flugsicherung, zum Geophysikalischen Beratungsdienst der Bundeswehr, zu mehreren Universitäten, zur Lufthansa und zu insgesamt 22 Wetterämtern und Flugwetterwarten, die der DWD auf dem Gebiet der Bundesrepublik betreibt. Der Ausbau der internationalen Netze in den Jahren 1973 bis 1975 führte sehr schnell zu einer Überlastung der 1967 konzipierten und im Frühjahr 1973 in Betrieb genommenen Anlage. Bereits 1974 war der DWD gezwungen, eine Erweiterung in Angriff zu nehmen, die gleichzeitig dazu benutzt wurde, um den Umzug in ein neues Betriebsgebäude in der Offenbacher Kaiserleistraße 42 zu realisieren.

Was wurde mit dieser Erweiterten Automatischen Fernmeldespeichervermittlung erreicht?

● Die Aufteilung in Eingangs- und Ausgangsverarbeitung sowie in eine Fernmeldeverarbeitung in zwei Zentraleinheiten gestattet einen Datenfluß, der etwa 20 Millionen Zeichen pro Tag im Eingang umfaßt und im Ausgang zwischen 50 und 60 Millionen Zeichen pro Tag erlaubt. Damit ist der DWD gerüstet für die Anforderungen des ersten weltweiten Experiments zur Erforschung der Atmosphäre, das 1978 anlaufen soll und bis Ende 1979 andauert. Die mit diesem Experiment verbundene gestiegene Datenmenge wird von der erweiterten Anlage verarbeitet.

- Die in der Erweiterten Automatischen Fernmeldespeichervermittlung gespeicherten Daten stehen in direktem Speicherzugriff allen angeschlossenen Zentralen und nationalen Institutionen zur Verfügung. Der Meteorologe ist damit nicht mehr angewiesen auf die per Sendeplan zugestellten Daten, sondern er kann jederzeit die im Augenblick für ihn notwendige Information im direkten Zugriff aus dem Speicher in Offenbach abrufen. Der enorme Datendurchsatz der neuen Anlage kann unmittelbar – das heißt in Realzeit – gesteuert werden und auf Vollständigkeit untersucht werden. Damit folgt der DWD internationalen Empfehlungen für Monitoring und Rerouting.

- Mit der erweiterten Anlage wurden die Voraussetzungen geschaffen für die Automation des Fernmelde-Betriebsdienstes bei den Wetterämtern und Flugwetterwarten im Bereich der Bundesrepublik Deutschland. Der Weg von der ersten Betriebsaufnahme im Frühjahr 1973 bis heute war lang und mit vielen Schwierigkeiten gespickt. Ein System, das 24 Stunden an sieben Tagen in der Woche unabhängig von Sonn- und Feiertagen stets seine Aufgaben erfüllen muß, gewinnt in der Realisierung eine Komplexität, die kaum noch beherrschbar ist. Daß trotzdem eine in der Praxis vertretbare Lösung erreicht wurde, ist der gemeinsamen Anstrengung von Programmierern und Ingenieuren bei Auftragnehmer und Auftraggeber sowie einer vertrauensvollen Zusammenarbeit mit dem Management von AEG-Telefunken zu verdanken. Hierbei wurde auf Seiten von AEG-Telefunken die Kontinuität der Projekte von Anfang an gepflegt. Die Entwicklung des Wetterfernmeldedienstes hat damit einen wichtigen Punkt erreicht, ist jedoch noch lange nicht abgeschlossen. Der weitere Ausbau der EDV auf Seiten der Meteorologie, der junge Zweig der Satellitenmeteorologie und die anstehenden Fortschritte auf dem Gebiet der Fernmeldetechnik werden neue Möglichkeiten eröffnen und Aufgaben stellen.



Abb. 1: Operatorraum mit Sichtgeräten, im Hintergrund das TR-86-Vierrechnersystem (Foto: AEG-Telefunken)

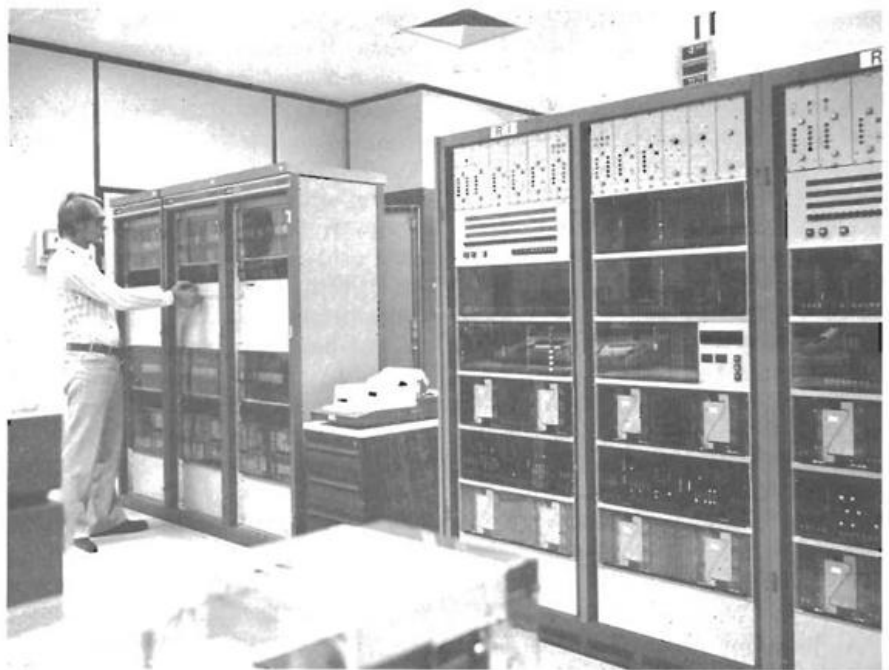


Abb. 2: Links die neuen AEG 80-20-Rechner, die für die Automatisierung des Flugwetterfernmeldenetzes und des TELEX-Betriebes verwendet werden (Foto: AEG-Telefunken)

Das Meteorologische Rechenzentrum des Deutschen Wetterdienstes

1 Allgemeines

Der Aufgabenbereich der Wetterdienste hat sich in den letzten Jahrzehnten ganz wesentlich erweitert. Deshalb erwies sich eine immer stärkere internationale Zusammenarbeit als vordring-

lich. Im Rahmen der World Meteorological Organization wurde daher die "World Weather Watch (WWW)" und innerhalb der International Civil Aviation Organization das "Area Forecast System (AFS)" ins Leben gerufen. Die WWW und das AFS besitzen ein Sys-

tem von Zentralen, denen bestimmte Aufgaben übertragen wurden.

Das Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach führt innerhalb der WWW die Aufgaben einer sogenannten Regionalzentrale durch. Aus-

serdem wurde dem Zentralamt für den internationalen Flugverkehr die Funktion eines "Area Forecast Centers" für Mitteleuropa und den Mittleren Osten (Flugstrecken nach Indien) übertragen. Daneben versorgt der Deutsche Wetterdienst die Deutsche Lufthansa mit meteorologischen Daten für die Flugstreckenplanung für fast die gesamte Nordhalbkugel.

Die Durchführung dieser nationalen und internationalen Verpflichtungen erfordert einen hohen Arbeitsaufwand. Zur Vermeidung erheblicher Personalverstärkung war eine Rationalisierung unbedingt notwendig. Ermöglicht wurde diese durch folgende Tatsache:

In den letzten Jahrzehnten hat die theoretische Meteorologie auf den Grundgleichungen der Dynamik und Thermodynamik basierende Modelle der Atmosphäre entwickelt, die es gestatten, Druck- bzw. Geopotentialverteilung sowie Temperatur- und Windverhältnisse vorzuberechnen. Die hierbei auftretenden Differentialgleichungen sind trotz weitgehender Vereinfachung nur numerisch lösbar. Der Rechenaufwand hierfür ist ungeheuer groß und nur mit Hochgeschwindigkeitscomputern zu bewältigen. Es wurde somit notwendig, ein Rechenzentrum für den Deutschen Wetterdienst zu installieren. Wirklich sinnvoll kann dieses Rechenzentrum jedoch nur dann eingesetzt werden, wenn alle Arbeitsgänge vom Eingang der Beobachtungen bis zur Berechnung der Vorhersagekarten maschinell durchgeführt werden. Eine der Hauptaufgaben der Rechenanlage ist es, die Meldungen in einer für die Rechenmodelle brauchbaren Weise aufzubereiten. Jeder manuelle Eingriff würde einen gewissen Personalaufwand und eine erhebliche Zeitverzögerung verursachen.

2 Aufbereitung meteorologischer Beobachtungen

Die eingehenden und vom Fernmeldecomputer gesammelten Meldungen ergeben täglich Material von etwa 80 000 bis 100 000 Fernschreibzeilen. Zu bestimmten Zeiten werden diese Rohdaten abgerufen und zunächst vom Entschlüsselungsprogramm verarbeitet. Da die meteorologischen Beobachtungen in einem leider wenig maschinengerechten Code übermittelt werden und außerdem fehlerbehaftet infolge von Meß- oder Auswertefehlern, falscher Codierung oder nicht einwandfreier Übertragung sind, ist der

größte Teil des Programms darauf gerichtet, derartige Fehler zu erkennen und, wenn möglich, zu korrigieren.

Entschlüsselt werden sowohl Beobachtungen von der Erdoberfläche als auch Messungen aus der freien Atmosphäre. Die entschlüsselten Meldungen werden in komprimierter Form mit Anmerkungen über ihre Zuverlässigkeit in einer sog. Datenbank abgelegt und stehen den Folgeprogrammen zur Verfügung.

Die Meldungen vom Boden und von der freien Atmosphäre werden in besonderen Programmen für die elektromechanischen Zeichengeräte aufbereitet. Die Eintragungen halten sich i.a. an die international vereinbarten Schemata und Symbole. Natürlich dürfen keine Stationsüberschneidungen auftreten.

Bei den Bodenmeldungen werden die Beobachtungen von Prioritätsstationen eingezeichnet und in noch verbliebene Lücken andere Meldungen nachgetragen. Diese Karten werden über Bildfunk verbreitet (Höhenkarten 2 x täglich, Bodenkarten bis zu 8 x täglich) und auch im Europäischen Wetterbericht veröffentlicht.

Besonders für die Kurzfristvorhersage ist die Kenntnis der vertikalen Verteilung von Temperatur, Feuchte und Wind sehr bedeutsam. Ein Programm wertet deshalb die entschlüsselten Meldungen bestimmter Radiosonden unter Einschluß sogenannter markanter Punkte aus. Letztere sind Höhenstufen in der Atmosphäre, an denen sich die Vertikalverteilung der 3 oben genannten Elemente sprunghaft ändert. Das Programm prüft die Meßpunkte auf etwa noch vorhandene Fehler und beschreibt ein Magnetband in einem von den Zeichengeräten zu interpretierenden Befehlscode. Auf diese Weise werden von 60 Stationen Höhendigramme von Temperatur, Feuchte und Wind zweimal täglich maschinell gezeichnet.

Die Karten und Diagramme (einschl. Analysen und Vorhersagen ca. 300 pro Tag) werden über Bildfunk ausgestrahlt und zum Teil im Europäischen Wetterbericht, einer Dokumentation des Deutschen Wetterdienstes, veröffentlicht.

3 Numerische Analyse

Vorbedingung für jede Wettervorhersage ist die Analyse des "Istzustandes",

also die Bestimmung der dreidimensionalen Verteilung der für das Wetter maßgebenden Elemente zum Zeitpunkt der Beobachtung. Der Meteorologe benutzt hierfür Eintragungskarten des Bodens und bestimmter Standarddruckflächen und zeichnet in diese Karten an Hand der Beobachtungen Isobaren, Luftmassengrenzen, Isothermen, Isohypsen, Isotachen usw.

Die numerische Analyse, also die Berechnung einer Analyse durch den Computer, muß einen anderen Weg einschlagen. Hier gilt es, für die Gitterpunkte eines über das betreffende Kartenformat gelegten kartesischen Koordinatensystems aus irregulär verteilten Beobachtungen eine Gitterfunktion zu ermitteln. Die Gitterfunktionen dienen als Ausgangsmaterial für die Vorhersagemodelle. Es wird z.Zt. noch ein Gitterabstand von 381 km in der stereographischen Projektion benutzt.

Ein Verfahren, das auch im Deutschen Wetterdienst angewendet wird, ist die sogenannte Korrektionsmethode. An einer Anfangsnäherung werden auf Grund der Beobachtungen iterativ Korrekturen angebracht, so daß eine Angleichung an die Meßwerte erfolgt. Die Anfangsnäherung kann eine vorangegangene Analyse, eine Vorhersagekarte, eine hydrostatische Aufrechnung von einer unteren Druckfläche und dergleichen mehr sein.

4 Numerische Vorhersage

Bei Kenntnis des Anfangszustandes können nun durch Integration von thermo- und hydrodynamischen Differentialgleichungen, die im wesentlichen die Vorgänge in der Atmosphäre beschreiben, Vorhersagen berechnet werden. Das System dieser Gleichungen ist jedoch so kompliziert, daß Vereinfachungen vorgenommen werden müssen. So blieben bisher Wärmequellen und -senken wie Strahlung, Kondensation, Verdunstung unberücksichtigt. Hierfür liegen auch meist keine entsprechenden Messungen vor. Auch mit diesen Vernachlässigungen sind die Gleichungen nur numerisch lösbar, das heißt, die Differentialgleichungen werden z.B. durch Differenzgleichungen ersetzt, vom Kontinuum wird auf ein horizontales oder räumliches Gitter übergegangen. Da die atmosphärischen Vorgänge Dimensionen von mehr als 10 Größenordnungen umfassen, die von der molekularen Diffusion bis zu großräumigen

Druckgebilden reichen, müßte das Gitter eigentlich außerordentlich engmaschig sein. Mit einem derart feinen Gitter zu arbeiten ist aus zwei Gründen unmöglich:

1. Es existieren keine Messungen, die die Feinstruktur der Atmosphäre wiedergeben.
2. An die Speicherkapazität und Rechengeschwindigkeit der Computer würden zur Zeit unerfüllbare Anforderungen gestellt.

Die Modellgleichungen werden daher weiter so vereinfacht, daß sie nur Phänomene berücksichtigen, die auch durch Messungen zu erfassen sind. Die berechneten Vorhersagekarten müssen daher fehlerbehaftet sein, sie übertreffen jedoch die Güte der nach konventionellen Methoden erarbeiteten Karten, und es kann ein Vorhersagezeitraum von 3 bis 4 Tagen überdeckt werden.

Im Deutschen Wetterdienst laufen verschiedene Vorhersagemodelle der Atmosphäre. Das barotrope Modell nimmt ein autobarotropes Verhalten der Atmosphäre an, das heißt, die Dichte soll lediglich vom Druck abhängen. Flächen gleichen Druckes sind damit auch Flächen gleicher Dichte. Weiterhin wird bei diesem Modell die Unabhängigkeit des horizontalen Windes von der Höhe vorausgesetzt. Damit kann die Atmosphäre durch ein zweidimensionales Gleichungssystem angenähert werden.

Im baroklinen Modell wird die Barotropiebedingung fallengelassen, das heißt die Flächen gleichen Druckes und gleicher Dichte (oder Temperatur) sind gegeneinander geneigt. Die für das atmosphärische Geschehen wichtigen Temperaturgegensätze sowie die Temperaturadvektion kommen ins Spiel, das Modell wird dreidimensional. Neben der statischen Grundgleichung tritt zu den Modellgleichungen der 1. Hauptsatz der Thermodynamik beziehungsweise wegen der Nichtberücksichtigung von Wärmequellen und -senken die Adiabatengleichung hinzu.

Die Vertikalstruktur wird i.a. durch Modellflächen in bestimmten Standardhöhen simuliert; für die z.Zt. 6 Flächen des Modells werden Geopotential, die horizontalen Windkomponenten und die Temperatur, für die Zwischenflächen die Vertikalbewegung

vorhergesagt. Dabei wird auch eine Vorhersage des Bodendruckfeldes geliefert.

5 Rechneraufwand für die numerischen Vorhersagen

Bisher erfolgte die Berechnung der Vorhersage bei einem Gitterpunktstand von 381 km an 2000 Gitterpunkten pro Fläche über der ganzen Nordhalbkugel, das bedeutet an 12000 Gitterpunkten in insgesamt 6 Flächen. An diesen Gitterpunkten wurden 5 Hauptvariable mit insgesamt ca. 1000 Befehlen pro Gitterpunkt in Zeitschritten von jeweils 5 Minuten Vorhersagezeit (Annäherung des zeitlichen Ablaufs einer Wellenbewegung durch kleine Zeitschritte) ausgewertet. Für die Berechnung einer 24stündigen Vorhersage war somit der Aufwand von $12\,000 \times 1000 \times 12 \times 24 = 3,456$ Milliarden Instruktionen erforderlich, der auf der CDC 3800, die eine Rechengeschwindigkeit von etwa 750 000 Befehlen pro Sekunde besaß, in einer Rechenzeit von reichlich 1 Stunde bewältigt werden konnte.

Die mit der CDC 3800 berechneten Vorhersagekarten für einen Zeitraum von 48 Stunden lagen ca. 8 Stunden nach Beobachtungstermin vor, die 24stündigen Vorhersagen etwa 1 Stunde früher.

Die Wahl des Abstandes von 381 km hat sich jedoch in den letzten Jahren als zu großzügig erwiesen, da kleinräumige Wettersysteme in ihrem Anfangsstadium mit diesem grobmaschigen Gitternetz nicht erfaßt wurden. Das gleiche gilt für die in 12 km Höhe auftretenden engbegrenzten Strahlströme, die mit maximalen Windgeschwindigkeiten von 400 km/h für die Luftfahrt von großer Bedeutung sind.

Es erhebt sich also die Forderung, vorrangig diese Grobmaschigkeit des Gitternetzes zu beseitigen. Zunächst ist eine Reduzierung des Gitterpunktabstandes auf etwa 254 km bei einer Vergrößerung des Vorhersagegebietes vorgesehen. Hiermit ist aber eine erhebliche Steigerung der Rechenzeit verbunden, die nur mit einer sehr leistungsfähigen Maschine aufgefangen werden kann. Im allgemeinen wächst der Aufwand an Rechenzeit bei derartigen Maschenweitenreduktionen mit der 3. Potenz, d.h. bei einer Halbierung der Maschenweite steigt die Rechenzeit um den Faktor 8. Es muß

nämlich aus Gründen der Wahrung der Stabilität des Vorhersageverfahrens auch der Zeitschritt, um den die Vorhersageberechnung mühsam fortschreitet, von zur Zeit 5 Minuten ebenfalls um diesen Faktor (beim DWD auf 3,33 min) vermindert werden. Andernfalls würden sich unrealistische Druckgebilde ergeben. Bei der Erhöhung der mit z.Zt. 6 Flächen noch unzureichenden vertikalen Auflösung auf 9 Flächen wächst der Faktor schließlich noch weiter an.

Es besteht weiter die Forderung, die dem Modell jetzt noch auferlegten physikalischen Beschränkungen nach und nach fallen zu lassen. Bei der notwendigen Einbeziehung des in der Atmosphäre vorhandenen Wasserdampfes und seiner in der Natur zu beobachtenden häufigen Phasenübergänge in die Gleichungssysteme ergeben sich mathematische Konsequenzen für den jetzt noch recht einfachen thermodynamischen Ansatz in Form einer weiteren Erhöhung des Rechenaufwandes. Sie bedingen zusätzlich einen Anstieg der pro Gitterpunkt zu bearbeitenden Instruktionen von 1000 auf 1500. Durch einen noch darüber hinausgehenden physikalischen Ausbau des Modells und eine Gebietsvergrößerung in die Tropen, wie sie von der Luftfahrt immer wieder gefordert wird, würde sich eine nochmalige Verlängerung der Rechenzeit ergeben.

An jedem der 45 000 räumlichen Gitterpunkte (5000 Gitterpunkte pro Fläche) müssen also für jeden Zeitschritt die Änderungen der wesentlichen meteorologischen Zustandsgrößen berechnet werden, was, wie oben erwähnt, bei dem neuen Modell einen Aufwand von ca. 1500 Maschinenbefehlen pro Gitterpunkt und Zeitschritt, also $1500 \times 45\,000 \times 18 \times 24 = 30$ Milliarden Befehle für eine 24stündige Vorhersage bedeutet.

Die vom Rechner vorgenommene Simulation der meteorologischen Verhältnisse soll für eine 24-Stunden-Vorhersage in ungefähr einer halben Stunde beendet sein. So stehen also für die Berechnung eines 3,3-Minuten-Schrittes vier Echtzeit-Sekunden zur Verfügung, was einer Rechengeschwindigkeit von ca. 16 Mio Befehlen pro Sekunde entspricht.

Die bisher beim Deutschen Wetterdienst installierten Rechner CDC 3400/3800 waren bei Anlegen eines internationalen Maßstabes diesen An-

forderungen nicht mehr gewachsen. Die von ihnen erreichte Rechengeschwindigkeit von 400 000 bis 750 000 Befehlen pro Sekunde ließ eine Steigerung der räumlichen und zeitlichen Auflösung des Vorhersageverfahrens sowie die Einbeziehung bisher vernachlässigter physikalischer Prozesse ohne Inkaufnahme längerer Rechenzeiten und – damit verbunden – sehr viel späterer Abgabe der Endprodukte nicht mehr zu.

6 Neues Rechnersystem des Deutschen Wetterdienstes

Um diesen Mängeln begegnen zu können, hat der Deutsche Wetterdienst im Herbst 1976 eine neue Anlage erhalten. Es handelt sich dabei um das System CYBER 172/173/76 der Control Data Corporation (CDC).

Die Anlage umfaßt einen sehr leistungsfähigen Rechner des Typs CYBER 76 und einen Rechner mittlerer Leistungsfähigkeit des Typs CYBER 173, der die CYBER 76 steuert und daneben noch in der Lage sein soll, Vorarbeiten und eigene abgeschlossene Programme abzuwickeln. Ferner ist eine zusätzliche CYBER 172 in Miniaturausstattung vorgesehen, die im Notfall die Steuerung der CYBER 76 sicherstellen soll. Andernfalls würde ein Ausfall der voll ausgerüsteten CYBER 173 notwendigerweise auch die CYBER 76 stilllegen.

Der Bedeutung der Anwendung angemessen sind verschiedenste Reserve-Möglichkeiten für den Fall von Gerätestörungen vorgesehen. Zunächst sind fast alle Peripheriegeräte mindestens zweifach vorhanden. Wegen der Umschaltbarkeit von Rechnern und Betriebssystemen ist dann beim Ausfall eines Peripheriegerätes schlimmstenfalls eine Beeinträchtigung der Leistung, nie ein Ausfall des Gesamtsystems zu erwarten. Dies gilt in beschränktem Maße auch für externe Massenspeicher.

Fällt der Rechner CYBER 76 aus, kann die Vorhersage mit hoher Auflösung nicht mehr ausgeführt werden, Modellvereinfachungen sind unvermeidlich. Es wird in diesem Fall auf das ältere Sechsschichtenmodell zurückgegriffen, das mit geringerer Auflösung arbeitet und deshalb auf dem langsameren Rechner CYBER 173 in dem festgelegten Zeitraum lauffähig ist.

Neben der Erhöhung der Verfügbarkeit des Rechners durch mehrfache Auslegung der Systembestandteile, die unerlässlich ist, wird bei allen CYBER-Modellen noch versucht, durch Fehler-Früherkennung schwache Baugruppen zu ermitteln. Bei den Rechnern CYBER 172/73 geschieht dies dadurch, daß Fehlerausgabe-Programme in gewissen Zeitabständen automatisch vom Betriebssystem angeworfen werden (Software-Methoden) und indem Leerlaufzeiten des Zentralrechners zur programmierten Prüfung der Geräte (Hardware-Tests) benutzt werden. Die Resultate der Hardware-Tests, zusammen mit Informationen über alle Fehler, die korrigiert werden konnten, sind für die Wartungsingenieure von einer Datei nach Fehlerart sortiert abrufbar und vermitteln wertvolle Hinweise auf sich häufende Unregelmäßigkeiten in einzelnen Baugruppen, die ihren baldigen Ausfall vermuten lassen. Diese Technik der Fehlererkennung ist bei dem Modell CYBER 76 aufs äußerste vervollkommenet, denn ein Ausfall dieses Rechners für eine Stunde würde den Verlust einer Rechenleistung bedeuten, die einer Tagesproduktion des Rechners CYBER 173 entspricht. Hier sind die oben erwähnten Software-Techniken mit Hardware-Techniken kombiniert, indem ein einzelner Rechner zur Wartungskontrolleinheit ausgebaut ist. In diesem peripheren Rechner laufen permanent Teile eines Wartungs-System-Programms, dessen einzige Aufgabe die

Hardware-Überwachung ist. Die Hardware-Überwachungskonsole hat Verbindung mit allen Baugruppen und Kanälen des Systems. Speicherfehler in allen peripheren Rechnern und in dem Zentralrechner werden sofort entdeckt.

7 Kurzbeschreibung der gesamten Rechner-Konfiguration

(Siehe hierzu Abb. 1 – 3).

Der Rechner mit der großen Rechenkapazität ist die CYBER 76. Diese Anlage ist lediglich mit dem Plattenspeichersystem 7639-2/891-1 ausgerüstet, 2 Datenströme können simultan betrieben werden. Auf diesen Plattenspeichern können lokale und permanente Dateien angelegt werden. Die CYBER 173 bzw. 172 ersetzen eine Operatorstation, d.h. alle Programme müssen über diese Rechner zugebracht werden. Druckdateien sowie alle sonstigen Dateien, auch solche auf Magnetbändern, werden über die kleineren Rechner ein- und ausgegeben und auf Platteneinheiten der CYBER 76 zwischengespeichert (sog. Staging). Ehe ein Programm auf der 76 beginnen kann, müssen also alle Eingabedateien über den betreffenden Satellitenrechner zugebracht worden und auf die Platten zwischengespeichert sein; alle Ausgabedateien werden gleichfalls zunächst auf Platte geschrieben und erst nach Jobende über den Vorschaltrechner ausgegeben.



Abb. 1: Rechnerraum mit Bedienungskonsolen (im Hintergrund Magnetband- und -platteneinheiten)



Abb. 2: Elektromechanische Zeichengeräte mit Steuergerät

Die CYBER 76 ist über Satellitenkoppler mit der CYBER 173 und 172 verbunden.

Die CYBER 173 hat über 2 Steuereinheiten Zugriff zu fünf 844-21-Plattenspeichern, so daß auch hier 2 Datenströme parallel betrieben werden können.

Alle Magnetbändereinheiten sind von der 173 aus ansprechbar, über Schalter können 4 Kanalanschlüsse geschaltet werden, so daß 4 Einheiten von diesem Rechner aus simultan betrieben werden können. Normalerweise werden die Bänder auch so angeschlossen sein. Es ist jedoch auch möglich, sowohl der 173 als auch der 172 Zugriff zu den Bändereinheiten zu gestatten.

DATENVERARBEITUNGSANLAGE DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES
CONTROL DATA CYBER 76/173/172

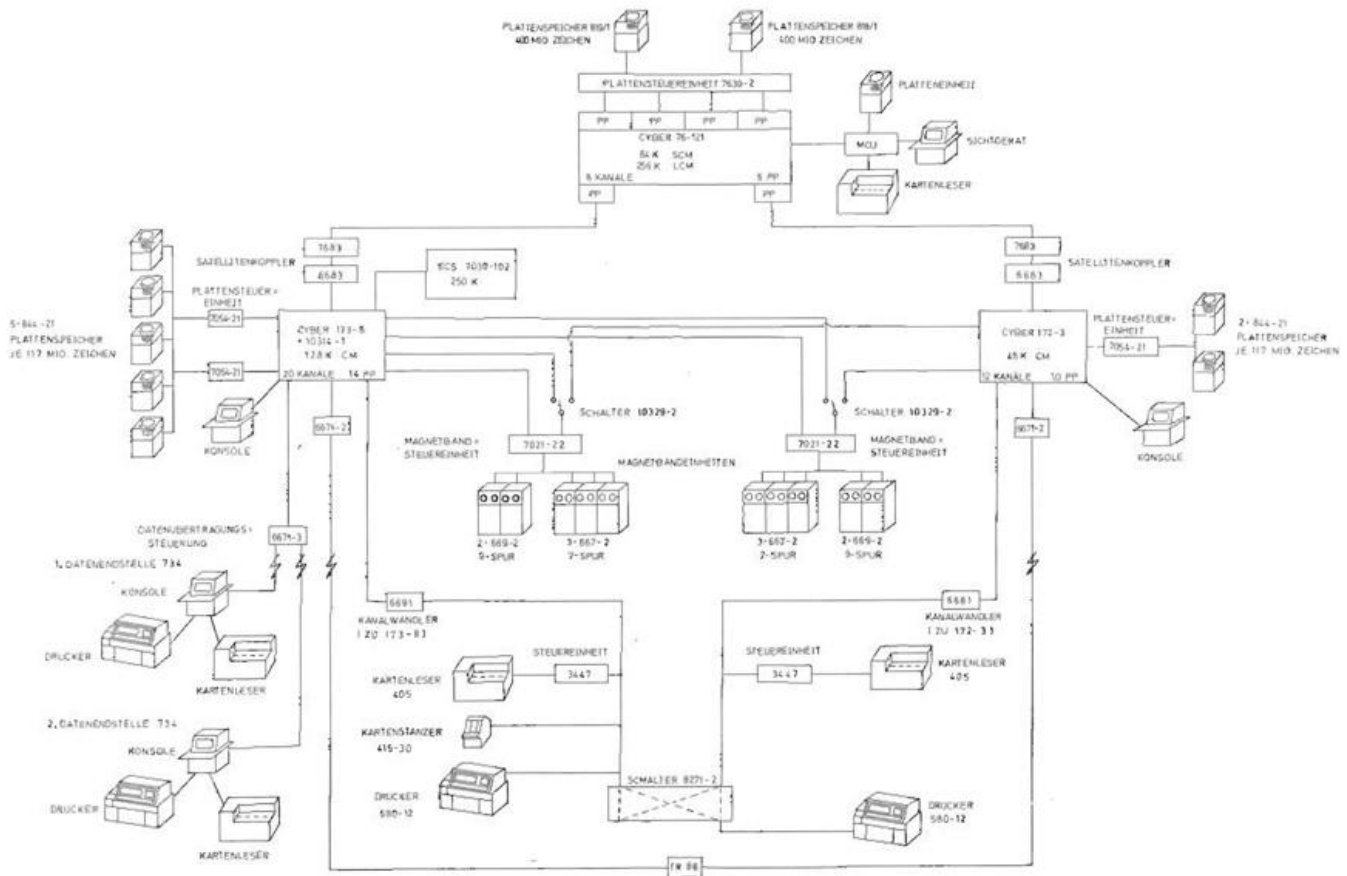


Abb. 3: Konfigurationsdiagramm

An sogenannter Papierperipherie sind 2 Drucker, 2 Kartenleser und 1 Kartenstanzer vorhanden.

Ein Anschluß der Datenendstationen ist nur für die CYBER 173 vorgesehen.

Die CYBER 172 ist für die Zeiten der vorbeugenden Wartung bzw. des Ausfalls der 173 gedacht. Sie ist minimal für die Steuerung der CYBER 76 und die Zubringung von Programmen und Ein- und Ausgabe von Dateien ausge-

stattet. Sie hat einen einfachen Zugriff zu zwei 844-Platteneinheiten, die Magnetbänder können nur über 2 Verbindungen angesprochen werden (zu jeder Steuereinheit ein Zugriff).

8 Schlußbemerkung

Vorstehende Betrachtungen sollten die Perspektiven aufzeigen, die sich bei der Benutzung der neuen Rechenanlage insbesondere für die numerische Vorhersageberechnung ergeben.

Es ist heute nicht mehr möglich, alle Produkte, die das Rechenzentrum liefert, konventionell zu erarbeiten. Der Personalaufwand wäre hierfür viel zu groß, abgesehen von Produkten wie die 48- und 72stündigen Vorhersagekarten in der von den numerischen Modellen gelieferten Qualität, die manuell nicht hergestellt werden können. Das Rechenzentrum ist deshalb aus dem Deutschen Wetterdienst nicht mehr wegzudenken.

R. LAMP, Offenbach

Das Barokline Modell BKF

In den vergangenen Jahren stützte sich die Numerische Wettervorhersage (NWV) im Deutschen Wetterdienst hauptsächlich auf ein *Barotropes Modell* (s. Promet 1'73) und ein *Baroklines Modell* (s. Promet 3'76), bei dem die Feuchte nicht berücksichtigt wurde. Um den großen Zuwachs an Rechengeschwindigkeit durch die neue Rechenanlage CYBER 76 für die NWV nutzbar zu machen, wurde ein neues *Baroklines Modell BKF* entwickelt, das die Atmosphäre nicht nur wesentlich besser physikalisch modelliert, sondern auch die numerischen Fehler durch ein feineres Gitternetz erheblich reduziert.

In diesem Modell wird insbesondere der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre als zusätzliche vorherzusagende Variable geführt und der Wasserkreislauf durch Verdampfung am Boden (und des ausfallenden Niederschlags) und Kondensation in der Atmosphäre teilweise simuliert. Dabei muß unterschieden werden zwischen großräumigen Niederschlagsfeldern, die noch als Prozeß modelliert werden, und konvektiven Niederschlägen, die wegen der zu groben Gitterstruktur nicht mehr direkt simuliert werden können, sondern in geeigneter Weise zu "parametrisieren" sind.

Großräumiger Niederschlag ergibt sich

bei stabiler Schichtung der Atmosphäre aus den an den Gitterpunkten berechneten Vertikalgeschwindigkeiten, sofern sie eine Anhebung der Luftmassen bewirken und schließlich Kondensation auslösen.

Bei instabiler Schichtung der Atmosphäre nimmt das Modell an, daß vertikale Umlagerungen stattfinden. Der Ablauf dieser Prozesse innerhalb einer vertikalen Gittersäule kann im Detail nicht mehr verfolgt werden; ihr Effekt muß mittels zusätzlicher Annahmen pauschal abgeschätzt, d.h. parametrisiert werden. Feuchtkonvektiver Niederschlag wird so zumindest im Mittel für ein Gitterquadrat vorhergesagt, wobei eine Aussage über die oft sehr ungleiche Verteilung innerhalb dieses Quadrates nicht möglich ist.

Der wichtige Austausch von Impuls, Wärme und Wasserdampf zwischen der Atmosphäre und dem Erdboden bzw. der Ozeanoberfläche wird durch die Verhältnisse in der bodennahen Reibungsschicht gesteuert, die aus diesem Grunde im Modell BKF wesentlich detaillierter behandelt wird. So wird z.B. der tägliche Gang der Einstrahlung und der langwelligen Ausstrahlung am Erdboden in einfacher Näherung berücksichtigt; dabei wird der feste Erdboden in zwei Schichten eingeteilt mit

der Fähigkeit, Wärme und Flüssigwasser zu speichern.

Das horizontale Integrationsgebiet ist weiterhin nahezu hemisphärisch und von achteckiger Form in der stereographischen Ebene; es reicht etwa 5 Breitengrade näher an den Äquator heran als beim trockenen baroklinen Modell. Der horizontale Gitterabstand wurde auf $\Delta x = 254$ km verfeinert, was ca. 5000 Gitterpunkte in einer Horizontalfläche bedeutet.

Die Atmosphäre ist vertikal in 9 Schichten unterteilt; der Wind, die Temperatur und in den unteren 6 Schichten auch die Feuchte werden nun in den Flächen 950, 850, 700, 550, 400, 300, 200, 100 und 50 mbar als prognostische Variable gerechnet. Der Zeitschritt Δt beträgt $3 \frac{1}{3}$ Minuten; damit benötigt eine 24stündige Prognose auf der CYBER 76 ca. 45 Minuten Rechenzeit.

Das Modell befindet sich zur Zeit noch in der Erprobung; es soll routinemäßig für Vorhersagen bis zu 96 Stunden eingesetzt werden.

(Auszug aus: REISER, H. u.a.: Methoden der numerischen Analyse und Wettervorhersage. Informationen f. d. Fachdienst, Heft 2/1978.)

Beschreibung des Modells SMOKA zur Berechnung von Kühlturmmissionen und deren Auswirkungen

Vorbemerkung

Seit kurzem verfügt der Deutsche Wetterdienst über ein neues Simulationsmodell zur Berechnung der Umweltbeeinflussung durch Kühltürme, das in nachfolgender Kurzbeschreibung vor-

gestellt wird. Dieses Modell wird z.Z. bereits für einzelne Gutachten und Projektstudien eingesetzt. Seine Verwendung im Rahmen von meteorologischen Standortgutachten des Deutschen Wetterdienstes für Kraftwerke ist vorgesehen.

Eine umfangreichere Beschreibung des Modells und seiner theoretischen Grundlage sowie eine Sensibilitätsstudie sollen im kommenden Jahr in den Berichten des Deutschen Wetterdienstes erscheinen.

1 Modellübersicht

SMOKA (Simulationsmodell für Kühlturm-Auswirkungen) ist ein thermodynamisches, eindimensionales, stationäres numerisches Modell zur Berechnung der Ausbreitung von Wärme und Wasser in der Atmosphäre über Kühltürme. Die durch Kühlturmmissionen veränderten Felder der den atmosphärischen Zustand beschreibenden Größen, d.h. auch der sichtbare Schwaden, können in ihrer räumlichen Lage dreidimensional dargestellt werden. SMOKA ist also den "quasi-dreidimensionalen" Modellen zuzurechnen (1).

Es können Gruppen mit mehreren, auch unterschiedlichen Quellen (Kühltürme/Schornsteine) berechnet werden.

Als Unterprogramme zur Berechnung des Luftzustandes in der Quellmündung stehen derzeit zur Verfügung: NASS für Naturzug-Naßkühltürme, TROCKEN für Naturzug-Trockenkühltürme und HYBRID für Ventilator-Hybridkühltürme. Je nach Umfang der vom Kühlturmhersteller gelieferten Daten müssen diese Unterprogramme angepasst werden. Die Quelldaten können auch unmittelbar vorgegeben werden, wenn sie bekannt sind (z.B. für Schornsteine).

Vorgegeben werden muß außerdem der Zustand der ungestörten Atmosphäre (Grundzustand). Dieser muß horizontal, homogen sein, jede beliebige vertikale Schichtung ist jedoch erlaubt. (Die derzeitige Programmerfassung sieht die Eingabe von maximal zehn markanten Punkten eines Radiosondenaufstiegs vor mit der jeweiligen Angabe von Höhe oder Luftdruck, Lufttemperatur, Taupunkt oder relative Luftfeuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit.)

2 Physikalische Grundlagen des Modells

Die Grundlagen des Berechnungsverfahrens sind die physikalischen Erhaltungssätze für Masse, Energie und Impuls, formuliert in den Kontinuitätsgleichungen für Luft und für Wasser, dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik und der Bewegungsgleichung.

Um den rechnerischen Aufwand in einem erträglichen Umfang zu halten, werden die Gleichungen durch die An-

nahme der horizontalen Homogenität des Grundzustandes und der Stationarität (Zeitunabhängigkeit) sowie durch die Vorgabe der Verteilungen in der zur Ausbreitungsrichtung normalen Ebene (Reduzierung auf eine Dimension) vereinfacht. Außerdem wird vorausgesetzt, daß ein quasihydrostatisches Gleichgewicht der Atmosphäre besteht, Trägheits- und Reibungskräfte vernachlässigbar sind und daß weder Phasenumwandlung noch Niederschlagsbildung über die Eisphase des Wassers stattfinden.

Wegen dieser Annahmen kann das Modell SMOKA nicht die innere thermodynamische Struktur der Fahnen (wie Quercirkulationen oder die Bildung von aufeinanderfolgenden Luftblasen) simulieren, sondern es wird die Schwadenform berechnet, wie sie sich bei gleichbleibender Emissionsstärke und Wetterlage im zeitlichen Mittel ausbildet.

Die Modellgleichungen umfassen folgende Vorgänge:

- Die Umwandlungen von potentieller, innerer und latenter Energie im ersten Hauptsatz der Thermodynamik,
- Kondensation und Verdampfung, sowie nach (2) die Umwandlung von Wolkentropfen in Regentropfen und den Ausfall von Niederschlag aus dem Schwaden in der Kontinuitätsgleichung für Wasser,
- den thermischen Auftrieb durch Temperatur- und Feuchteerhöhung, das Gewicht der Wassertropfen, den Kopfwiderstand der aufsteigenden Luftblasen, die Übertragung von Horizontalimpuls aus der Umgebungsluft auf den Schwaden in den Bewegungsgleichungen.

Ferner ändern sich die Erhaltungsgrößen des Modells (Masse-, Energie-, Wasser- und Impulsgehalt) aufgrund der Vermischung von Schwaden- und Umgebungsluft. Die empirischen Ansätze in SMOKA enthalten sowohl das durch die Bewegung des Schwadens relativ zur Bewegung der Umgebungsluft bedingte Entrainment (Umgebungsluftimport in den Schwaden) als auch die Vermischung aufgrund des Turbulenzzustandes der Umgebungsluft, der durch die Richardson-Zahl beschrieben wird.

Der Einfluß großer Gebäude auf die Ausbreitungsvorgänge bei hohen Windgeschwindigkeiten wird ebenfalls empirisch simuliert: ein von den Gebäudemaßen und der Windgeschwindigkeit abhängiger Leewirbel wird dem Bewegungsfeld der Grundströmung überlagert.

Bei Gruppen von mehreren Emissionsquellen wird die gegenseitige Beeinflussung der Fahnen im Vermischungsansatz und in der Berechnung des Auftriebs berücksichtigt.

Die Gleichungen werden in Differenzenform bei einer Schrittweite von einem Meter iterativ gelöst.

Durch das Gleichungssystem des Modells werden die Werte des Wärme- und Wassergehalts sowie der Windvektorkomponenten längs der Schwadenachse berechnet. Für die Verteilung dieser Größen in der zur Ausbreitungsrichtung normalen Ebene werden Profile vorgegeben, die aus Messungen (3) oder aus Berechnungen mit aufwendigeren Modellen (4) abgeleitet werden. Entsprechend der Simulation der Diffusion bieten sich Exponentialfunktionen an, die jedoch wegen des thermischen Auftriebs in der Vertikalen asymmetrisch sein und von der thermischen Schichtung abhängen müssen. Die hier benutzten Profile werden deshalb aus linearen und exponentiellen Funktionen zusammengesetzt und ändern sich mit der Entfernung von den Quellen in Abhängigkeit von der thermischen Schichtung.

Die in SMOKA angewandten physikalischen Beziehungen und Vereinfachungen werden in ähnlicher Form allen entsprechenden eindimensionalen Simulationsmodellen zugrundegelegt (1), (5), (6). Unterschiede ergeben sich jedoch in den empirischen Ansätzen für die Vermischung von Schwaden- und Umgebungsluft.

Mehrdimensionale Modelle enthalten wohl weniger Vereinfachungen, erfordern allerdings eine wesentlich höhere Rechenzeit. Hier bestehen außerdem größere Schwierigkeiten, die für eine Kalibrierung und spätere Anwendung erforderlichen meteorologischen Daten bereitzustellen.

Das Modell SMOKA wurde mit den bei der Meßserie von Neurath gewonnenen Daten kalibriert (7).

3 Leistungsumfang des Modells

Das Modell SMOKA bietet einen ausgewogenen Kompromiß zwischen möglicher Simulationspräzision, Rechenaufwand und verfügbaren meteorologischen Daten.

Nachfolgend aufgeführte Kühlturnauswirkungen werden durch SMOKA berechnet:

- Erhöhung der Lufttemperatur
- Erhöhung der Luftfeuchtigkeit

- räumliche Lage und Ausdehnung des sichtbaren Schwadens
- Nebelbildung
- Wolkenbildung
- Erhöhung des Niederschlags
- Beschattung entsprechend der Lage des sichtbaren Schwadens und dem Sonnenstand.

Das Modell kann zur Berechnung der Ausbreitung von Schadstoffen in Verbindung mit den Kühlturnschwaden erweitert werden.

Die räumliche Zuordnung wird in ei-

nem kartesischen und in einem in die Hauptwindrichtung gedrehten Koordinatensystem vorgenommen. Als Ausdruck sind derzeit wahlweise zu erhalten: Vertikalschnitte längs der Ausbreitungsrichtung (Abb. 1), Vertikalschnitte normal zur Ausbreitungsrichtung (Abb. 2), Horizontalschnitte in vorzugebender Höhe und eine Tabellierung aller Werte längs der Schwadenachse.

Die CPA-Rechenzeit des Modells (FORTRAN-Programm) beträgt auf



Abb. 1: Vertikalschnitt durch die für den 15.12.1973, 11.30 Uhr berechneten Abluftfahnen der Kühltürme des Kraftwerks Neurath längs zur Ausbreitungsrichtung. (Die sichtbaren Schwaden sind schraffiert; die durch Punkte dargestellten Höhenlinien haben einen Abstand von jeweils 200 m.)

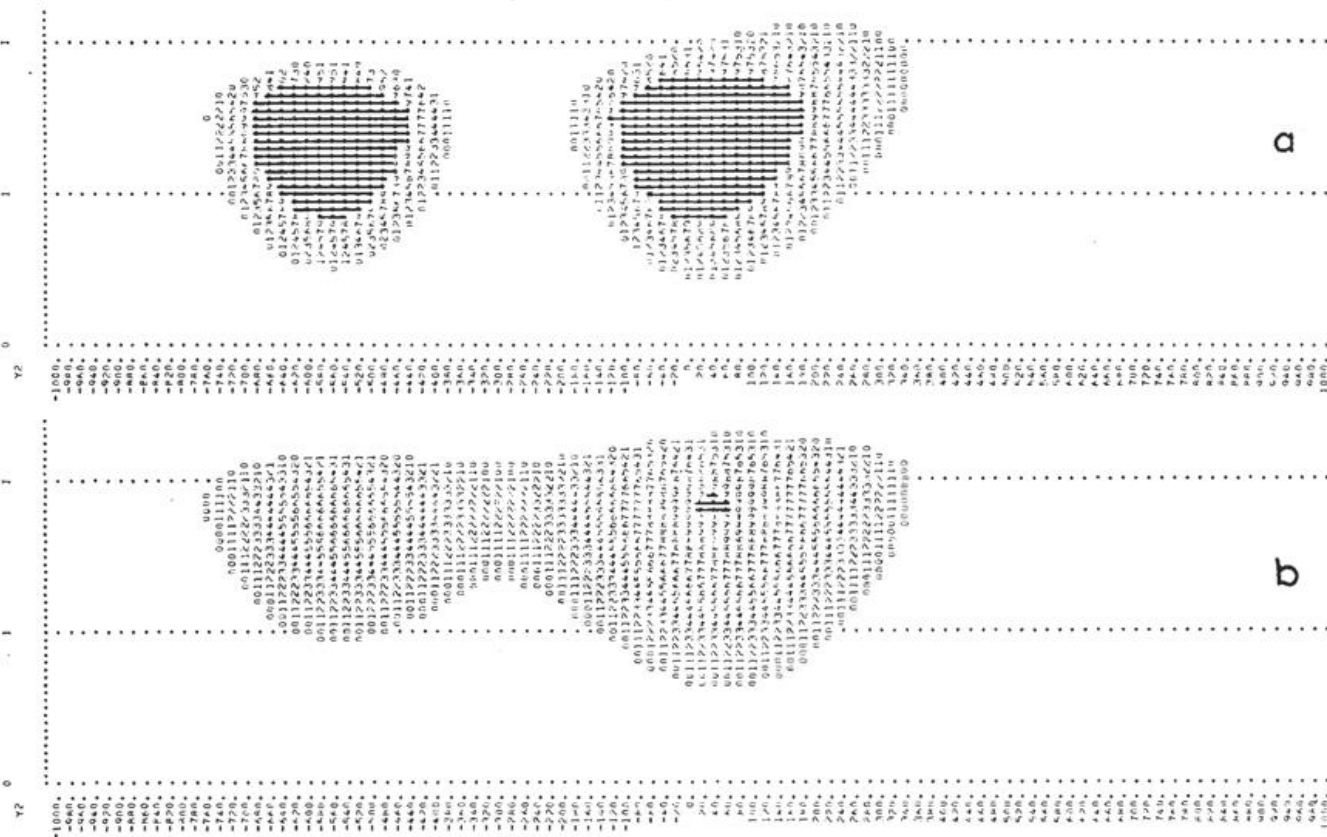


Abb. 2: Vertikalschnitte durch die Abluftfahnen einer hypothetisch angenommenen Kühlturmgruppe quer zur Ausbreitungsrichtung. Der Abstand der Schnittebene zu den Quellen beträgt a) 500 m, b) 750 m. (Die sichtbaren Schwaden sind schraffiert; die durch Punkte dargestellten Höhenlinien haben einen Abstand von jeweils 200 m.)

der CYBER 173 des Deutschen Wetterdienstes mit Ausdruck des Längs- und des Querschnitts je Einzelfall und je Quelle rund 30 s, für die reine Modellrechnung ohne Ausdruck, wie bei einer unmittelbar anschließenden statistischen Bearbeitung möglich ist, werden weniger als 15 s je Einzelfall und je Quelle benötigt.

Literatur

(1) SAUER, E.

Abwärmeproblem bei Kraftwerken. Kühlsysteme, Kosten, Umweltaspekte und Abwärmenutzung. Jül-1255, KFA Jülich Dez. 1975.

(2) KESSLER, E.

On the distribution and continuity

of water substance in atmospheric circulations. Meteorol. Monogr. Amer. Meteorol. Soc. 10 (1959).

(3) FORTAK, H. u. Mitarbeiter

Messungen an Kühlturmfahnen. T. 4: Ergebnisse von Meßkampagnen an den Kühltürmen der RWE-Kraftwerke Neurath und Meppen. Jül-1250 (Teil 4), KFA Jülich Mai 1976.

(4) NESTER, K.

Simulation der Wirbelstruktur der Abluftströmung aus Kühltürmen. GFK Karlsruhe, 1976.

(5) ROMSTEDT, P.

Literaturstudie und Materialsamm-

lung über die Umweltbeeinflussung durch Kühlturbetrieb sowie kritische Stellungnahme zu den vorgeschlagenen mathematischen Modellen von Kühlturmfahnen. Bericht erstellt i. Auftr. d. Bayer. Staatsmin. f. Landesentwicklung u. Umweltfragen, Juni 1975 (Maschinenvervielf.).

(6) RUDOLF, B.; FRAEDRICH, K.

Konvektion über Kühltürmen. Ann. d. Meteorol. 9 (1974) S. 65–68.

(7) VDI

Untersuchungen an einem Naturzug-Naßkühlturm. Fortschrittsberichte d. VDI-Zeitschrift. R. 15, Nr. 5 (1974).

B. RUDOLF, Offenbach

Aus dem Geophysikalischen Beratungsdienst der Bundeswehr

Funk-Prognosen

Einführung

Im militärischen Bereich werden elektromagnetische Wellen für verschiedene Aufgaben genutzt. Sie dienen als Hilfsmittel im Fernmeldewesen sowie in Frühwarnsystemen, und sie werden zur Steuerung von Lenkwaffensystemen oder für Fernerkundungen eingesetzt. Eine genaue Kenntnis der aktuellen und der zu erwartenden Ausbreitungsverhältnisse kann für die Erfüllung eines militärischen Auftrages entscheidend sein.

Der Einfluß geophysikalischer Faktoren auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ist das Arbeitsgebiet des Dezernats "Radiogeophysik" im Amt für Wehrgeophysik. Aus seinem umfangreichen Aufgabenkatalog soll in diesem Aufsatz nach der Erläuterung radiogeophysikalischer Grundtatsachen das Erstellen von *Funk-Prognosen* besprochen werden.

Einflüsse der Ionosphäre auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen mit Frequenzen unterhalb von etwa 80 MHz (oberhalb einer Wellenlänge von ca. 3.75 m) wird in erster Linie von der Ionosphäre beeinflusst. So wird der Höhenbereich der Atmosphäre von etwa 60–1000 km genannt, in dem ionisierte Atome/Moleküle sowie freie Elektronen exi-

stieren und mit den auftretenden elektromagnetischen Wellen in Wechselwirkung treten. Vertikale Unterschiede der Elektronen-Konzentration, die in komplizierter Weise von der Dichte und der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre sowie vom Sonnenstand und Sonnenaktivität gesteuert werden, führen tagsüber zu folgender Struktur der Ionosphäre:

Mittlere Elektronenkonzentration in der Ionosphäre (tagsüber)

Ionosphäre	Höhenbereich bereich km	Zahl der neu- tralen Teilchen pro cm ³	Zahl der Elek- tronen pro cm ³	Verhältnis Elek- tronenzahl zu Anzahl der neu- tralen Teilchen
D-Schicht	60 – 90	10 ¹⁶	10 ³	1 : 10 ¹³
E-Schicht	90 – 125	10 ¹³	10 ⁵	1 : 10 ⁸
F ₁ -Schicht	um 200	10 ⁹	10 ⁵	1 : 10 ⁴
F ₂ -Schicht	200 – 400	10 ⁷	10 ⁵	1 : 10 ²

Nachts ist nur noch ein einziges Maximum der Elektronen-Konzentration im Höhenbereich zwischen 200 und 400 km vorhanden: die F-Schicht.

Die Längswellen (30 000 bis 5 000 m) werden im System Erde – Ionosphäre ähnlich wie in einem technischen Hohlleiter geführt, d.h. sie können nicht durch die Ionosphäre hindurch

in den freien Raum eindringen. Sie erfahren dabei eine im Verhältnis geringe Dämpfung, und die Ausbreitungsbedingungen sind nur unbedeutenden tages- und jahreszeitlichen Änderungen unterworfen. Die Anfälligkeit gegenüber ionosphärischen Störungen ist im allgemeinen gering. Die Längswellen stellen also ein sehr zuverlässiges Fernmeldemittel dar.

Die Langwellen und – in stärkerem Maße noch – die Mittelwellen (5000 – 200 m) werden tagsüber in der D-Schicht gedämpft. Ursache dafür ist die im Verhältnis zu der Zahl der freien Elektronen noch große Anzahl neutraler Teilchen. Eine auftretende Welle regt die freien Elektronen zum Mitschwingen an; diese aber erfahren

infolge der Anwesenheit der erwähnten zahlreichen neutralen Teilchen eine erhebliche Dämpfung. Die auftretende elektromagnetische Energie wird also in der Ionosphäre zu einem großen Teil vernichtet. Zwischen Sender und Empfänger ist nur die sogenannte Bodenwelle möglich. Ihre Reichweite ist auch bei entsprechend hoher Sendeleistung hauptsächlich wegen der Absorption elektromagnetischer Energie durch die Erdoberfläche begrenzt. Nachts jedoch ist die dämpfende D-Schicht nicht mehr vorhanden. Auftreffende Wellen des Lang- und Mittelwellenbereichs können an der F-Schicht reflektiert werden, da die Zahl der dort vorhandenen neutralen Teilchen für eine Dämpfung nicht mehr ausreicht. Damit kann eine Raumwelle zustandekommen, die vom Sender über die Ionosphäre zum Empfänger gelangt. Große Entfernungen (Hunderte von km) werden auf diese Weise ohne nennenswerte Intensitätsverluste überbrückt. Durch das Zusammentreffen von mehreren Raumwellen mit der Bodenwelle am Ort des Empfängers kommt es zu deutlichen Interferenzerscheinungen. Die Folge davon sind quasi-periodische Schwankungen der Empfangsfeldstärke (Fading), kurzzeitige Totalausfälle sowie Modulations- und Phasenverzerrungen. Von den genannten Effekten kann man sich sehr leicht selbst überzeugen, wenn man die Mittelwellenskala eines Rundfunkgerätes einmal tagsüber und einmal abends durchdreht. Am Tage wird man nur einige nahegelegene Sender empfangen können, abends jedoch sind viele, z.T. weit entfernte Stationen hörbar, wobei häufig Störungen durch Interferenzen, Fading, Verzerrungen und Gleichwellensender auftreten.

Eine Fernmeldeverbindung über Kurzwellen (200 – 10 m) wird in der Regel nur mit Hilfe der vom aktuellen Zustand der Ionosphäre stark abhängigen Raumwellen abgewickelt, da die Reichweite der entsprechenden Bodenwelle zu gering ist (grob gesagt: je nach Empfängerempfindlichkeit und Störpegel über Land bis 30 km, über See bis 100 km). Der Betreiber einer Kurzwellenfunklinie muß wissen, zu welcher Tages- bzw. Jahreszeit er welcher der ihm zugeteilten Frequenzen benutzen kann, um einen gegebenen Ort auf der Erde zu einer bestimmten Zeit sicher zu erreichen. Diese Informationen vermitteln die Funkprognosen.

Einflüsse der Troposphäre

Die Meter- und Zentimeterwellen sowie die noch kürzeren Wellen des Millimeter- und Infrarotbereiches werden von der Ionosphäre im allgemeinen nicht beeinflusst. Sie durchdringen diese Schicht nahezu ungehindert, da die entsprechenden Frequenzen bereits so hoch sind, daß keine Wechselwirkungen mit den freien Elektronen zustande kommen können. Entscheidend für die Ausbreitung in diesen Wellenlängenbereichen ist der aktuelle Zustand der Troposphäre, wobei die räumliche und zeitliche Verteilung von Luftfeuchte, Lufttemperatur und Hydrometeoren in der unteren Troposphäre den Ausschlag gibt. Diese Elemente beeinflussen die Brechungsindizes atmosphärischer Schichten. Die Abhängigkeit von der Luftfeuchte dominiert. Dem Brechungsgesetz von SNELLIUS zufolge wird der Verlauf eines Funkstrahles durch die Änderungen des Brechungsindex und nicht durch dessen Absolutwert bestimmt. Daher rufen Schichten mit markanten Feuchteänderungen (z. B. feuchtkühle Grundschicht mit überlagerter trockenwarmer Oberschicht) besonders deutliche Brechungseffekte (Refraktionen) hervor, die zu Funkstörungen führen können. Das bekannteste Beispiel sind Fernsehstörungen durch Überreichweiten (Meterwellenbereich). Zur Erfassung der Ausbreitungsbedingungen ist demzufolge eine detaillierte Kenntnis der vertikalen Verteilung von Luftfeuchte und Lufttemperatur notwendig. Ein aktuelles Feuchte- und Temperaturprofil von einem aerologischen Aufstieg läßt sich leicht in ein Vertikalprofil des Brechungsindex umrechnen. Damit und mit Hilfe der Differentialgleichung der Strahlbahn, die mit dem bereits genannten Brechungsgesetz eng zusammenhängt, lassen sich Aussagen über die Ausbreitungsbedingungen gewinnen, die zur Erarbeitung von Funkprognosen gebraucht werden.

Für Millimeter und Submillimeterwellen spielen neben den Refraktionsverhältnissen auch Absorption und Streuung an Hydrometeoren sowie die in diesem Bereich vorhandenen Absorptionsbanden der atmosphärischen Gase eine Rolle. Darüber hinaus werden Infrarotwellen auch noch von der räumlichen und zeitlichen Verteilung natürlicher und künstlicher Aerosole beeinflusst.

Begriffe der Kurzwellen-Übertragungstechnik

Als erstes sind die LUF (Lowest usable frequency) sowie die MUF (Maximum usable frequency) zu nennen. Frequenzen unterhalb der LUF werden – analog wie die Mittelwellen tagsüber – in der Ionosphäre gedämpft. Damit ist keine Raumwelle möglich und auch kein Weitverkehr. Für Frequenzen oberhalb der MUF gibt es ebenfalls keine Raumwellen, da die Ionosphäre in diesem Fall durchlässig ist. Nur in dem Frequenzbereich zwischen LUF und MUF können sich Raumwellen ausbilden und für Fernverbindungen genutzt werden.

Die Werte von LUF und MUF sind eine Funktion des aktuellen Elektronenkonzentrationsprofils in der Ionosphäre und deshalb von der jeweiligen Tages- und Jahreszeit und dem Sonnenfleckenzyklus (regelmäßige Ionisierungs-komponente) sowie von den Sonneneruptionen (unregelmäßige Ionisierungs-komponente) abhängig.

Eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Kurzwellenausbreitung spielt die "Tote Zone". Darunter versteht man einen Bereich mit einem Radius bis zu 1000 km und mehr um den Kurzwellensender, in dem keine Raumwelle existiert und in dem – abgesehen von der Nahzone, in der die Bodenwelle empfangen werden kann – die Station nicht hörbar ist. Außerhalb der "Toten Zone" erreichen Raumwellen die Erdoberfläche. Der Empfang ist dann in der Regel gut, wenn man von Interferenzstörungen durch mehrere gleichzeitig eintreffende Raumwellen absieht. Verantwortlich für das Zustandekommen der "Toten Zone" ist das von der Frequenz, dem Einfallswinkel und der Elektronenkonzentration abhängige Reflexionsverhalten der Ionosphäre. Strahlt man mit Hilfe eines Kurzwellensenders mit variabler Frequenz senkrecht nach oben in die Ionosphäre (s. Abb.), so wird der Funkstrahl für Frequenzen unterhalb eines bestimmten Grenzwertes – der sogenannten Grenzfrequenz – an der Ionosphäre reflektiert und zur Erde zurückgeworfen. Für alle Abstrahlwinkel am Sender werden Raumwellen zustandekommen (Bild 1a), auch in der unmittelbaren Umgebung des Senders. Es gibt in diesem Fall also keine "Tote Zone". Ist die Sendefrequenz größer als die Grenzfrequenz, so bilden sich bei hinreichend flachem Abstrahlwinkel Raumwellen aus. Wird

jedoch ein bestimmter Grenzwinkel überschritten, so wird die Ionosphäre durchdrungen. Es gibt dann keine für den Fernmeldebetrieb nutzbaren Raumwellen mehr.

Zu dem Grenzwinkel, für den sich gerade noch eine Raumwelle ausbilden kann, gibt es einen bestimmten Abstand vom Sender – die Sprungentfernung –, in dem diese Welle am Erdboden ankommt und empfangen werden kann. Zeichnet man um den Sender einen Kreis, dessen Radius gleich der Sprungentfernung ist, so erhält man näherungsweise die äußere Begrenzung der "Toten Zone" um den Sender (Bild 1b).

Für das Zustandekommen einer Kurzwellenweitverbindung lassen sich also nur solche Frequenzen verwenden,

- die zwischen LUF und MUF liegen und
- für welche der Empfangsort nicht in einer "Toten Zone" liegt.

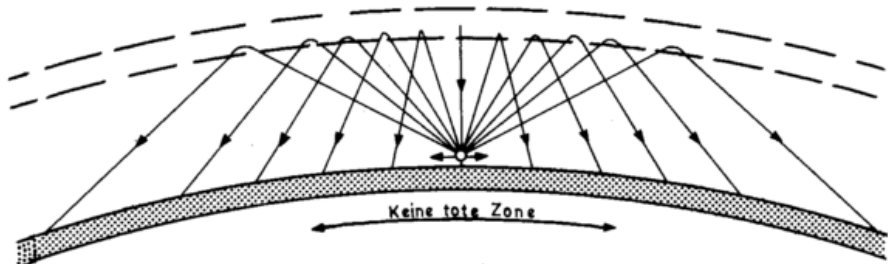


Bild 1a Betriebsfrequenz kleiner als Grenzfrequenz

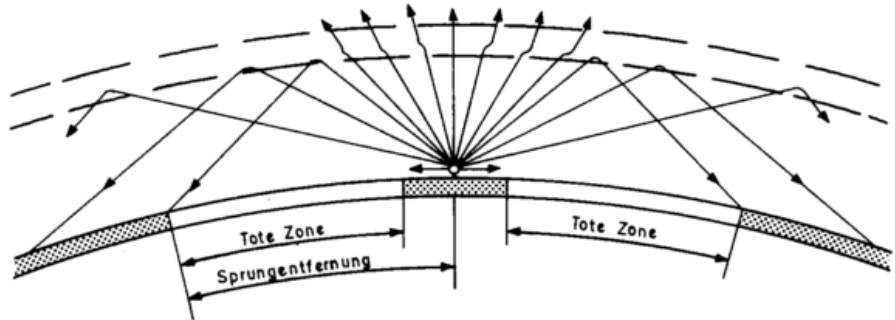


Bild 1b Betriebsfrequenz größer als Grenzfrequenz

Schematische Darstellung der Toten Zone

Funkprognosen

Es wurde gezeigt, daß LUF, MUF und Tote Zone vom Ionisierungszustand abhängen. Wenn man die Elektronenkonzentration oder die entsprechende physikalisch äquivalente Meßgröße kennt, kann man mit Hilfe von inzwischen gut fundierten theoretischen und empirischen Beziehungen zu den gewünschten Aussagen über die Ausbreitungsverhältnisse im Kurzwellenbereich gelangen.

Langfristige Prognosen

Die Erfassung des regelmäßigen Anteils der Ionisierung, der eine Funktion der Tages- und Jahreszeit ist, ist mit Hilfe mathematisch-physikalischer Rechenmodelle möglich. Die komplizierten Zusammenhänge zwischen Sonnenstand, geographischer Lage und Ausbreitungsverhältnissen sind durch die Erfahrung gut belegt. Auch läßt sich der Einfluß des Sonnenfleckenzyklus verhältnismäßig genau abschätzen. Auf dieser Grundlage lassen sich langfristige Funkprognosen (Vorhersagezeitraum einige Wochen bis zu einigen Monaten) erstellen.

Das Basismaterial dazu erstellt das Fernmeldetechnische Zentralamt der Deutschen Bundespost. Im Amt für Wehrgeophysik wird dann eine auf die Bedürfnisse des militärischen Anwen-

ders zugeschnittene Prognose erarbeitet, d.h. der optimal nutzbare Frequenzbereich wird in Form von Tabellen und leicht lesbaren Diagrammen für jede Stunde des gewünschten Zeitraumes und für die gewünschte Funkstrecke zusammengestellt. Diese Prognosen gehen regelmäßig an einen festen Kreis von Beratungsnehmern. Sie werden aber auch im Rahmen spezieller Anforderungen (z.B. für die Planung von militärischen Übungen) ausgeben.

Kurzfristige Prognosen und Funkstörungswarnungen

Außer den oben erwähnten Variationen im Kurzwellenempfang treten noch Störungen und Ausfälle auf, die durch die unregelmäßigen Anteile an der Ionisierung verursacht werden. Diese hängen meistens mit der Sonnenaktivität und den häufig damit Hand in Hand gehenden Schwankungen des erdmagnetischen Feldes zusammen. Die Wahrscheinlichkeit für Ausbrüche auf der Sonne und die dann möglicherweise zu erwartenden Funkstörungen lassen sich in der Regel vorhersagen, aber nicht die genauen Eintrittstermine solcher Ereignisse. Es gibt jedoch bestimmte Störeffekte auf die Kurzwellenausbreitung, die mit einer bis zu 40 Stunden dauernden Phasenverzögerung gegenüber dem Be-

ginn einer Sonneneruption auftreten. In diesem Fall verbleibt nach deren Wahrnehmung noch Zeit für eine Warnung.

Darüber hinaus gibt es Prozesse auf der Sonne, welche die Funkwellenausbreitung entscheidend beeinflussen und die man bis heute weder zwingend erklären noch vorhersagen kann. Nicht zuletzt dadurch treten gelegentlich unvorhersehbare Störungen des Funkverkehrs auf.

Informationen über die sich aus dem aktuellen bzw. kurzfristig zu erwartenden Elektronenkonzentrationsprofil in der Ionosphäre ergebenden Konsequenzen für die Kurzwellenausbreitung lassen sich mit Hilfe einer Ionosonde gewinnen. Dieses ist ein senkrecht nach oben strahlender Kurzwellensender mit variabler Sendefrequenz. Aus der Art der am gleichen Ort bzw. in einigen 1000 km Entfernung empfangenen Signale lassen sich Rückschlüsse auf Grenzfrequenzen, LUF und MUF anstellen. Ein derartiges Instrument wird vom Institut zur langfristigen Kontrolle geophysikalischer Umweltbedingungen (ILKGU) in Lindau am Harz betrieben. Die dort routinemäßig angestellten Messungen gehen in die Diagnose und in die kurzfristige Prognose der aktuellen Ausbreitungsverhältnisse entscheidend ein.

Ein weiteres Hilfsmittel zur Erfassung aktueller Ausbreitungsbedingungen stellt eine Überwachung der Empfangsfeldstärke von bestimmten weltweit verteilten Kurzwellensendern dar. Voraussetzung ist, daß Sendeleistungen, Frequenzen und Antennendiagramme dieser Stationen genau bekannt sind. Aus der Art des Verlaufs der Empfangsfeldstärke in Abhängigkeit von der Frequenz, der Tages- bzw. Jahreszeit sowie aus dem Fadingver-

halten kann man unter Zuhilfenahme von theoretischen und empirischen Beziehungen ebenfalls auf die aktuellen und kurzfristig zu erwartenden Ausbreitungsverhältnisse schließen. Eine solche Empfangsstation betreibt die Deutsche Bundespost in Lüchow-Dannenberg.

Das Amt für Wehrgeophysik erhält täglich die von der Post aus den Ionosondenmessungen und aus der Überwachung der Empfangsfeldstärke abgelei-

teten Informationen über die Kurzwellenausbreitung. Mit deren Hilfe wird eine kurzfristige Prognose der Ausbreitungsverhältnisse erarbeitet. Falls dagegen kurzfristig unregelmäßige Ionisierungseffekte und damit Funkstörungen oder sogar Totalausfälle zu erwarten sind, gehen entsprechende Warnungen an die Beratungsnehmer.

K.-E. FISCHER, Traben-Trarbach

Aus der Weltorganisation für Meteorologie (WMO)

VII. Tagung der WMO-Fachkommission für atmosphärische Wissenschaften (CAS) in Manila, 27. Febr. – 10. März 1978

Fachliche Ergebnisse

Fachliche Schwerpunkte waren die Gebiete Wettervorhersageforschung, Forschungsprogramm über tropische Meteorologie, Wetterbeeinflussung sowie Klimawechsel und -veränderlichkeit.

Globales Atmosphärisches Forschungsprogramm (GARP)

Dieses von WMO und ICSU (International Council of Scientific Unions) gemeinsam getragene Programm soll

- (a) die Wettervorhersage mit numerischen Modellen verbessern und
- (b) die physikalische Basis des Klimas zum Zwecke der Modellierung erforschen.

Da inzwischen die Planungen für das im Dezember 78 anlaufende "First GARP Global Experiment" (FGGE) praktisch abgeschlossen sind, sieht die CAS ihre Wirkungsmöglichkeiten bezüglich der Zielsetzung (a) nur in der an FGGE anschließenden Forschungsphase, in der die Ergebnisse direkt für die operationellen Erfordernisse der Wetterdienste nutzbar gemacht werden sollen.

Während der Sitzung wurden vorläufige Resultate des von der USSR, Indien und anderen Mitgliedsstaaten (auch DDR) gemeinsam durchgeführten Forschungsprojekts "Monsoon 77" bekanntgegeben und mit Beifall aufgenommen, ebenso wie die Ankündigun-

gen der USSR, mit 3 zusätzlichen Schiffen das FGGE-Beobachtungsprogramm im Indischen Ozean zu verstärken, und der Philippinen, ein ozeanographisches Forschungsschiff für das "Tropical Wind Observing System" in den benachbarten Gewässern abzustellen.

Forschung auf dem Gebiet der Wettervorhersage

Die Diskussionen zu diesem für die Wetterdienste zentralen Thema gliederten sich in vier Teilbereiche:

- (a) Numerische Wettervorhersage (NWV) Innerhalb der letzten Jahre wurden in der operationellen NWV beachtliche Fortschritte erreicht; neue numerische Techniken und leistungsfähigere Rechenanlagen haben es erlaubt, die Modelle insbesondere durch höhere horizontale Auflösung (feinere Gitter), aber auch bessere physikalische Ausgestaltung zu verbessern. Auch auf den Gebieten der Datenassimilation und -analyse sind als Folge neuer Beobachtungstechniken (insbesondere von polarumlaufenden und geostationären Satelliten) Fortschritte zu verzeichnen, die sich besonders in der mit konventionellen Beobachtungssystemen unzureichend ausgestatteten Südhalbkugel bemerkbar machen; dagegen konnte in der Nordhemisphäre – vor allem in den mittleren Breiten – ein

direkter Nutzen der Satellitenbeobachtungen für die operationelle NWV bis jetzt nicht überzeugend nachgewiesen werden. CAS war deshalb der Ansicht, daß es besonders dringlich sei, bessere Datenassimilations- und Analysentechniken entsprechend den Charakteristika dieser neuen Beobachtungssysteme zu entwickeln, um sie optimal auszuschöpfen. Dabei wurde auch auf das zunächst für FGGE vorgesehene ASDAR-System (Aircraft to Satellite Data Relay) hingewiesen, von dem mehr und bessere AIREP-Meldungen erwartet werden. Als besonders zukunftssträftig gilt ferner die Entwicklung geeigneter statistischer Methoden, die an die in der NWV errechneten, großräumigeren atmosphärischen Feldverteilungen Aussagen über die Wettererscheinungen anschließen sollen, wobei ggf. auch regionale bzw. lokale Besonderheiten Eingang finden können.

Ferner wurde über die Anwendung von NWV-Techniken für die Vorhersage von Luftverschmutzungen und quantitative Niederschlagsvorhersagen kurz berichtet; im Hinblick auf die länger anhaltende Trockenperioden (droughts) im Tropenbereich stellte die Kommission fest, daß selbst Spekulationen über Vorhersagemöglichkeiten auf der Basis gegenwärtiger Modelle noch verfrüht seien. Es wurde aber die Notwendigkeit betont, diese Vorhersagemethoden und Modellentwicklungen an meteorologischen Zentren in den Tropen besonders zu fördern.

(b) Verbesserung der Genauigkeit der Wettervorhersagen
Besonderer Wert wird auf besseres physikalisches Verständnis und die Modellierung mesoskaliger Phänomene gelegt, um damit bessere Vorhersagen auch für kürzere Perioden von einigen Stunden zu erreichen. Dies ist von besonderer Wichtigkeit für die Ausgabe zuverlässigerer Warnungen. Daneben wurden noch erhebliche Verbesserungsmöglichkeiten im Bereich der synoptisch-statistischen Vorhersagemethoden und im Ausbau eines sog. "man-machine-mix"-Konzeptes gesehen.

(c) Langfristvorhersage

Hierunter werden von CAS Vorhersagen über **mindestens 30 Tage** verstanden. Obwohl auf diesem Sektor in der letzten Zeit keine Fortschritte eingetreten sind und es noch keine allgemein akzeptierte Vorhersagemethode gibt, wurde dieser Forschungsrichtung eine außerordentliche Bedeutung wegen des erwarteten hohen wirtschaftlichen Nutzens zuerkannt. Nach Ansicht der CAS bedingen künftige Fortschritte in der Langfristvorhersage nicht nur ein besseres Verständnis der Allgemeinen Atmosphärischen Zirkulation, der Wechselwirkungen mit dem Ozean und der Strahlungsprozesse, sondern auch bessere und reichhaltigere Datenquellen und eine leistungsfähigere Datenverarbeitung.

Die Kommission beschloß die Einrichtung einer **Arbeitsgemeinschaft für Wettervorhersageforschung**, die aus einer Untergruppe für Kurz- und Mittelfristvorhersage und einer Untergruppe für Langfristvorhersage bestehen wird. Zu ihren Aufgaben gehört es, die von der Kommission gegebenen Anregungen in die Tat umzusetzen, die relevante wissenschaftliche Entwicklung zu beobachten und ggf. durch spezielle Hilfeleistungen (Daten- und Programmaustausch, Ausbildungsmaterial) zu fördern. IAMAP (International Association for Meteorology and Atmospheric Physics), JOC und CBS (WMO-Fachkommission für Basis Systeme) werden eingeladen, je einen Experten für die Mitarbeit zu benennen; damit soll eine bessere Koordinierung der internationalen Zusammenarbeit auf diesem Sektor erreicht werden.

Forschungsprogramm für Tropische Meteorologie

Dieses Forschungsprogramm wurde in 4 Bereiche unterteilt:

(a) **Tropische Zyklonen**

mit 3 Projekten höchster Priorität:
"Global tropical cyclone data for research purposes"
"Small-scale cycloidal motions of tropical cyclones"
"The association of tropical cyclogenesis with large-scale circulation changes"

(b) **Monsun**

mit 3 Projekten höchster Priorität:
"Surface water balance in numerical models"
"Long-term programme for monsoon studies"
"Factors determining the large-scale circulation in the tropics including the seasonal migration of the ITD/ITCZ"

(c) **Meteorologie der ariden und semi-ariden Zonen — tropische Trockenperioden**

mit 2 Projekten höchster Priorität:
"Data requirements for estimating the likelihood of droughts"
"The routine monitoring of the moisture budget over limited tropical areas with particular reference to agricultural needs"

(d) **Tropische Störungen, besonders der zugehörige Niederschlag**

mit 1 Projekt höchster Priorität:
"Application of meteorological statistical information, particularly that relating to rainfall occurrence, to regional economic needs"

Projekte höchster Priorität können sofort begonnen werden, wenn WMO-Gelder zur Verfügung stehen; daneben enthält das Programm noch eine Reihe weiterer Projekte, denen entweder eine geringere WMO-Priorität zugebilligt wird oder die nur mit speziellen nationalen Zusagen begonnen werden können.

Wegen seines möglichen praktischen Nutzens stellt dieses WMO-Forschungsprogramm für Tropische Meteorologie eine wesentliche Ergänzung relevanter GARP-Aktivitäten in den Experimenten GATE, MONEX, FGGE dar und sichert die Weiterführung dieser Forschungen über GARP hinaus; für eine effektive Durchführung wird die Einrichtung einer speziellen Datenbank

für Forschungszwecke, in der Routinedaten zweckmäßig archiviert werden, für notwendig gehalten.

Die Kommission empfahl auch zwei allgemeinere Projekte: Datensammlung (Strahlung, Verdunstung, Bodentemperatur etc.) für landwirtschaftliche und hydrologische Zwecke und Fortbildungsprogramme für Meteorologen in den Tropen. Ferner sollen zusätzliche Projekte formuliert werden zu den Problemen: Auftreten von Staub über tropischen Regionen und Bestimmung und Vorhersage von Sturmwoogen (storm surges) in Verbindung mit tropischen Zyklonen.

Wetterbeeinflussung

Auf diesem Gebiet wurde in den vergangenen Jahren große Aktivität entwickelt. Die Planung für das **Niederschlagsverstärkungsprojekt** (Precipitation Enhancement Project, PEP) wurde weitergeführt und geographische Gebiete für PEP nach bestimmten Richtlinien ausgesucht. Während PEP die Niederschlagsverstärkung in unterkühlten Schichtwolken auf einem Gebiet von rund 10.000 km² versuchen soll, wurde vor einer Verallgemeinerung der PEP-Ergebnisse auf andere Gebiete mit konvektiven Wolken oder sog. warmen Wolken gewarnt.

Bezüglich der rechtlichen Gesichtspunkte der Wetterbeeinflussung wiederholte die Kommission ihre Ansicht, daß zunächst weitere Fortschritte im wissenschaftlichen Verständnis der physikalischen Prozesse abgewartet werden müssen, ehe dazu Stellung genommen werden könne. Zur Zeit besteht keine Notwendigkeit, die offizielle WMO-Stellungnahme "Zum gegenwärtigen Wissenstand und praktischen Nutzen auf einigen Gebieten der Wetterbeeinflussung" zu revidieren.

Experimente zur **Hagelunterdrückung** werden in mehreren Ländern, insbesondere in der USSR durchgeführt, z.T. bereits auf operationeller Basis. Die Kommission war der Ansicht, daß zunächst eine Reihe wissenschaftlicher Fragen zu lösen seien, bevor der Vorschlag eines internationalen Projekts auf diesem Gebiet weiterverfolgt werden kann.

Experimente zur **Taifun-Beeinflussung** durch Impfung werden von den USA gemeinsam mit den Philippinen geplant. Die Kommission empfahl drin-

gend, die Forschung über tropische Zyklonen (insbesondere Modellrechnungen) zu verstärken sowie die möglichen Folgen einer Impfung einschließlich unerwünschter Nebeneffekte abzuschätzen.

Troposphärische Umweltforschung

Unter dieser Thematik wurden die vier Arbeitsbereiche: Luftverschmutzung und Luftchemie, Lufterlektrizität, Grenzschicht sowie Turbulenz und Wellenbewegung zusammengefaßt.

Das WMO-Meßnetz zur Überwachung der Hintergrund-Luftverschmutzung mit Stationen ist erweitert worden, die auch andere, für UNEP wichtige Substanzen messen. Erwünscht ist ein Experiment zum "Multimedia monitoring of pollution" (Atmosphäre, Binnengewässer, Boden und Vegetation), für das das bestehende Meßnetz herangezogen werden soll. CAS soll sich in Zukunft um die statistische Auswertung der vom Meßnetz gewonnenen Daten von Lufttrübung, chemischer Zusammensetzung des Niederschlags und anderer Meßgrößen kümmern, um ihre Variabilität, jahreszeitliches Verhalten, Zeitgänge und räumliche Verteilung zu bestimmen. Dazu ist es notwendig, eine Zentrale für die Sammlung, Qualitätskontrolle, Speicherung und Archivierung der entsprechenden Daten zu schaffen.

Folgende Punkte auf dem Gebiet der troposphärischen Chemie und Luftverschmutzung verdienen hohe Priorität:

- (a) Großräumiger Transport der Luftbeimengungen einschließlich Staub sowie ihre stoffliche Umsetzung;
- (b) Fluß der Luftbeimengungen durch die Grenzfläche Atmosphäre/Ozean, insbesondere von Kohlendioxid, sowie die biologisch-geologischen Kreisläufe der Luftbeimengungen;
- (c) Luftverschmutzung durch mehrere Quellen (Multiple-source air pollution), wobei die Kopplung von Vorhersagemodellen für den regionalen bzw. mesoskaligen Bereich mit Diffusionsmodellen sowie die Einbeziehung der Strahlungseigenschaften der Atmosphäre über den Städten und Industriegebieten besonders aussichtsreich erscheinen;
- (d) Troposphärische Chemie, hier vor

allem Erzeugung und Zerstörung des troposphärischen Ozons sowie seine Reaktionen mit anthropogenen und natürlichen Spurengasen wie z.B. Terpenen.

Das Gebiet **Lufterlektrizität** wurde nur verhältnismäßig kurz behandelt und die Meinung vertreten, daß es von der entsprechenden IAMAP-Kommission ausreichend betreut wird, so daß sich weitere WMO-Aktivitäten erübrigen.

Im Bereich **Grenzschicht** lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung von Parametrisierungs-Schemen für die Grenzschichten in Atmosphären- und Ozeanmodellen. Für die weitere Erforschung der tropischen Grenzschicht bilden die in GATE gewonnenen Daten die wesentlichen Grundlagen, so daß eine Beschleunigung der Datenaufbereitung in den GATE-Datenzentren dringend erwünscht ist. Weltkarten der Oberflächenrauigkeit (Rauigkeitshöhe z_0) sollten zweckmäßigerweise durch Weltkarten von Typen der Bodennutzung ersetzt werden.

Folgende fünf Teilgebiete sollten nach Meinung der CAS vorrangig untersucht werden:

- (a) Theoretische und experimentelle Untersuchungen über den Einfluß von Inhomogenität, Instationarität und Baroklinität auf Grenzschichtprozesse;
- (b) Verhalten und Struktur der Grenzschicht bei starker Wechselwirkung mit der freien Atmosphäre, insbesondere auch die Entwicklung starker Windscherungen in niedrigen Höhen;
- (c) Struktur und Entwicklung der nächtlichen Grenzschicht und ihre Wechselwirkung mit Schwerewellen;
- (d) Parametrisierungsverfahren zur Einbeziehung der Phänomene (a), (b), (c) in numerische Modelle;
- (e) Entwicklung von Fernerkundungsverfahren zur Beobachtung oder Ableitung von Grenzschichtstrukturen und -flüssen.

Wegen der Bedeutung von Grenzschichtprozessen für die Wettervorhersage im subsynoptischen Bereich, Luftverschmutzung und Klimamodelle (Wechselwirkung Atmosphäre/Ozean)

wurde der Arbeitsgruppe für Probleme der atmosphärischen Grenzschicht aufgetragen, engen Kontakt zu der Arbeitsgruppe für Wettervorhersageforschung, der Arbeitsgruppe für Luftverschmutzung und troposphärische Chemie und dem CAS-Ausschuß für Globalklima zu halten.

Die Berichterstattung über **Turbulenz und Wellenbewegung** befaßte sich mit der Beschreibung der drei Mechanismen, durch die Turbulenz oberhalb der Grenzschicht entsteht: Windscherung, Auftrieb und Schwerewellen. Die zukünftige Arbeit auf diesem Gebiet soll sich auf die "Clear Air Turbulence (CAT)" konzentrieren, wobei folgende Punkte besondere Beachtung verdienen:

- (a) ein weltweiter Überblick über die Frequenzverteilung der troposphärischen Turbulenz;
- (b) Nachweismöglichkeiten von Turbulenz durch Strahldichte-Reihenmessungen von geostationären Satelliten aus;
- (c) die mögliche Rolle von CAT in der Erzeugung von potentiellen Vorticity-Maxima und ihr Einfluß auf kurzfristige barokline Entwicklungen;
- (d) Prüfung der gegenwärtigen Scherungsschicht-Modelle anhand passiver radiometrischer Turbulenzmessung vom Flugzeug aus.

Diese Untersuchungen sind von grossem Wert für die Flugsicherheit sowie zur Verbesserung von Flugrouten-Empfehlungen.

Stratosphärische Umweltforschung

Unter diesem Titel waren folgende vier Themen zusammengefaßt: Globales Ozonforschungs- und -überwachungsprojekt, Meteorologie der oberen Atmosphäre, Programm "Mittlere Atmosphäre" (MAP) und Stratosphärische Erwärmungen.

Das von CAS initiierte **Ozonprojekt** bildet den Kern des UNEP-Weltplanes für die Ozonschicht-Aktivitäten. Es ist eng verknüpft mit dem Programm für die mittlere Atmosphäre, insbesondere hinsichtlich der Vertikalverteilung des Ozons und der Überwachung des UV-B. Grundlage des Projekts ist ein weltweites Meßnetz von Stationen, die

den Gesamt ozonegehalt der Atmosphäre mit Dobson-Spektrometern messen. Als Ergänzung dienen die UV-Rückstreumessungen vom Satelliten aus und Messungen der Vertikalprofile von solchen Spurengasen, die den Ozongehalt beeinflussen, wie z.B. Stickoxide und Chlorofluoromethane.

Die Kommission erkannte die Notwendigkeit, die Messungen der spektralen und zeitlichen Verteilung der UV-B-Strahlung an der Erdoberfläche erheblich auszudehnen. Hohe Priorität wurde der Verbesserung des Eichstandards und der Entwicklung von geeigneten Eich- und Vergleichsverfahren zuerkannt, um die Genauigkeit der UV-B-Daten zu verbessern.

Der Bericht über die **Meteorologie der oberen Atmosphäre** befaßte sich im wesentlichen mit der Genauigkeit der Temperatursondierungen durch Radiosonden, Raketensonden und Satellitenbeobachtungen in Stratosphäre und Mesosphäre. In Zukunft sollen diese Untersuchungen im Rahmen des MAP weitergeführt werden.

Das Programm "**Mittlere Atmosphäre**" (MAP) ist aus SESAME = Structure and Energetics of the Stratosphere and Mesosphere hervorgegangen und befaßt sich mit der Meteorologie der Atmosphäre von der Tropopause bis zur Mesopause. Insbesondere wurden die möglichen Einflüsse der Abgase von hoch fliegenden Flugzeugen und von bestimmten, von der Erdoberfläche nach oben diffundierenden chemischen Verbindungen auf die Ozonschicht behandelt, ferner die Kopplung von unterer und mittlerer Atmosphäre und die Rolle solarerterrestrischer Einflüsse in Klimastudien.

In MAP einbezogen werden soll in Zukunft auch der Forschungsbereich **Stratosphärische Erwärmungen**. Das von Frau Prof. Labitzke (Berichterstatterin) entwickelte System von Stratwarm-Alarm (Minor warming, major warming, Canadian warming) wurde gutgeheißen und zur weiteren Anwendung empfohlen. Da die numerischen Modelle zur Simulation stratosphärischer Phänomene bisher noch keinen vollen Erfolg aufweisen, wurde von CAS die Notwendigkeit unterstrichen, bessere Beobachtungsdaten mit höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung und bis in größere Höhen zu gewinnen. In diesem Zusammenhang kommt auch den Strahlendichteda-

ten von Satelliten wesentliche Bedeutung für die Überwachung der oberen Stratosphäre zu.

Anwendung von Satellitendaten in der Forschung

Wesentliche Gesichtspunkte und Erkenntnisse über die Nutzenwendungen der Wettersatelliten sind in einer WMO-Technical Note "Quantitative Meteorological Data from Satellites" zusammengefaßt. Zukünftige Entwicklungen sollten sich nach Auffassung der Kommission vor allem auf die methodische Verbesserung und optimale Anwendung von indirekten Temperatur- und Feuchtesondierungen, von Windabschätzungen aus dem Wolkenzug sowie von Wasseroberflächentemperaturen und anderen Bodenparametern für die Zwecke der Wettervorhersage und -analyse konzentrieren. Auch wurde die Bedeutung der Satellitenbeobachtungen für das Studium der Strahlungsbilanzen und großräumiger Transporte von Staub und anderen Verschmutzungen hervorgehoben. Für die Zukunft wird erwartet, daß eine bessere horizontale und vertikale Auflösung der Temperatur- und Feuchte-daten auch detailliertere Studien wesentlicher mesoskaliger Phänomene ermöglichen wird.

Klimaänderungen und -variabilität

Dieses Thema befaßte sich mit dem Welt-Klima-Programm, dem Forschungs- und Überwachungsprojekt für Kohlendioxid, der atmosphärischen Strahlung sowie mit den solarerterrestrischen Beziehungen.

Das **Welt-Klima-Programm** (World Climate Programm, WCP) wird von zahlreichen internationalen Organisationen unter Führung der WMO getragen. Es gliedert sich in die drei Unterprogramme:

- "World Climate Services and Data Programme",
- "World Climatic Change Research Programme" und
- "World Climate Impact Programme".

Obwohl die CAS im wesentlichen mit dem Forschungsprogramm innerhalb des WCP befaßt ist, hat CAS auch für die beiden anderen Unterprogramme bestimmte Aufgaben zu übernehmen, z.B. physikalisch-statistische Analysen der Datensätze oder die Bereitstellung von realistischen Werten bestimmter

Parameter an die "Benutzer"-Kommissionen wie COSAMC, CAgM, CHy, CMM usw.

Ihre Aufgaben im WCP sieht die CAS in der Entwicklung von Verfahren zur Ermittlung und Vorhersage der Wirkungen, die menschliche Aktivitäten auf das Klima haben können, sowie in einer Verbesserung unseres Verständnisses der physikalischen Grundlagen des Klimas, auch im Hinblick auf die Entwicklung von Möglichkeiten zur Vorhersage zukünftiger Trends innerhalb des wahrscheinlichen Bereichs von Fluktuationen und des Auftretens von Extremen. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei den folgenden Punkten zu widmen:

- (a) Die klimatischen Folgen eines Anstiegs des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre;
- (b) Die Wirkungen auf das globale Klima, die von beträchtlichen Veränderungen in der Beschaffenheit und der Ausdehnung des Meereises ausgehen;
- (c) Die Wirkung einer Abnahme des Ozongehalts der Atmosphäre auf das Klima.

In diesem Zusammenhang wurden von CAS in den letzten Jahren die Forschungs- und Überwachungsprojekte für Ozon bzw. Kohlendioxid geschaffen (s. o.). Andere wichtige Gesichtspunkte sind Strahlung und Aerosol sowie solarerterrestrische Beziehungen. Als ein wichtiger Teil der Klimaforschung wird das Verständnis der Meer-eis-Prozesse und die Parametrisierung zur Simulation ihrer Wirkungen in Klimamodellen angesehen.

Die Modelle, mit denen die Wirkung menschlicher Aktivitäten auf das globale Klima simuliert werden, werden noch als verhältnismäßig elementar angesehen, so daß es noch intensiver weiterer Forschungen bedarf, bevor die WMO eine offizielle Stellungnahme dazu abgeben kann. Unter anderem sollen die **regionalen** Auswirkungen, etwa an den Polen und am Äquator, weiter untersucht werden, die von einer Erhöhung der globalen Mitteltemperatur der Erdoberfläche zu erwarten sind. Weiterhin sollen in Betracht gezogen werden:

- (a) die physikalischen Effekte und Wechselwirkungen von Bodennut-

zung, Albedo und Strahlung im regionalen und globalen Klima;

- (b) die Größenverteilung und die optischen Eigenschaften der Aerosole und ihre unmittelbaren Wirkungen auf die Wärmebilanz bei klarem und bedecktem Himmel;
- (c) die Wirkungen natürlicher Naturerscheinungen wie Änderungen der Sonnenstrahlung, Vulkanausbrüche, Änderungen der Eigenschaften von Ozean- und Landoberfläche;
- (d) die Entwicklung globaler Zirkulationsmodelle unter Einschluß von Meereszirkulation, Meeres-eigenschaften und Bewölkung.

Wegen der großen Bedeutung, die das CAS dem Welt-Klima-Programm beimißt, wurde zur Koordinierung dieser Aufgaben ein neu geschaffenes "CAS Global Climate Committee" bestellt.

Da der Anstieg des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre voraussichtlich

der wichtigste anthropogene Faktor ist, der das globale Klima beeinflussen könnte, wurde in den vergangenen Jahren vom CAS das **Kohlendioxidprojekt** ins Leben gerufen. Höchste Priorität wird der Errichtung eines globalen Meßnetzes zur simultanen Messung des Kohlendioxidgehalts zugeteilt, wobei Meßtechnik und Datenaufbereitung streng standardisiert und miteinander verglichen werden müssen. Etwa 8–10 Stationen, die nicht notwendig mit den "background air pollution network"-Stationen zusammenfallen müssen, werden als ausreichend angesehen. Als Ergänzung werden CO₂-Meßflüge von Forschungsflugzeugen in der Troposphäre empfohlen. Da CO₂ an dem weltweiten Kohlenstoffkreislauf teilnimmt, wird die Zusammenarbeit mit anderen beteiligten Wissenschaften wie Geologie, Ozeanographie, Biochemie usw. gefördert.

Die Arbeiten auf dem Gebiet der **atmosphärischen Strahlung** haben große Bedeutung für die Verbesserung des Verständnisses von Strahlungsprozessen

in der Atmosphäre, insbesondere für die Energiebilanz, die allgemeine Zirkulation und etwaige Klimaänderungen. Die Modelle zur Strahlungsübertragung, auch in Wolken, sind inzwischen erheblich verbessert worden, ferner wesentliche Fortschritte im Verständnis der optischen Eigenschaften des Aerosols erzielt worden. Ebenso ist die Technik der Fernerkundung vom Satelliten aus zum Nachweis von Spurenstoffen in der Atmosphäre verbessert und ihr Einfluß auf die Strahlungsprozesse in der Atmosphäre untersucht worden.

Auf dem Arbeitsgebiet **Solar-terrestrische Beziehungen** wird vor allem versucht, sichere physikalische und statistische Beweise für solche Beziehungen zu erbringen. In diesem Sinne wird neuerdings von Solar-terrestrischer Physik und Meteorologie (STP-M) gesprochen.

(Auszug aus einem Bericht des DWD über die CAS-Tagung. Berichterstatter: H. REISER u. F. KASTEN)

XXX. Sitzung des Exekutiv-Ausschusses (EC) in Genf, 20. 5. bis 15. 6. 1978

In den Fachsitzungen lagen die Schwerpunkte bei folgenden Programmen (Projekten):

Welt-Wetter-Wacht (WWW)

Der weitere Ausbau des globalen Beobachtungssystems und des globalen Fernmeldesystems ist in einigen Gebieten zum Stillstand gekommen oder hat in den letzten zwölf Monaten nur sehr langsame Fortschritte gemacht. Das trifft insbesondere auf die Regionen 1 (Afrika), 2 (Asien) und 3 (Mittel- und Süd-Amerika) zu.

Globales atmosphärisches Forschungsprogramm (GARP) und erstes Globales GARP-Experiment (FGGE)

Die Vorbereitungen für das Ende 1978 beginnende FGGE sind im wesentlichen abgeschlossen. Als Ersatz für den ursprünglich von der UdSSR zugesagten Satelliten werden die USA (in Zusammenarbeit mit der ESA) einen fünften geostationären Satelliten in einer Position über dem Indischen Ozean in Position bringen. China wird

sich am FGGE beteiligen und zwei Schiffe für das tropische Wind-Beobachtungssystem zur Verfügung stellen. Der polarumlaufende Satellit Tiros N der USA wird in eine Umlaufbahn um die Erde geschossen werden. Es wächst die Befürchtung, daß das globale Experiment sich in einzelne auf kleine geographische Bereiche beschränkte Experimente zersplittert, weil die in diesen Regionen liegenden Staaten an diesen Unterprogrammen stärker als an FGGE selbst interessiert sind.

Welt-Klima-Programm (WKP) und Welt-Klima-Konferenz (WKK)

Das WKP wird in den kommenden Jahren noch stärker an Bedeutung gewinnen als das jetzt schon der Fall ist. Es werden damit folgende Hauptziele verfolgt:

- (a) Es soll die Kenntnis der natürlichen Variabilität des Klimas sowie die Bedeutung der Klimaänderungen (ausgelöst durch natürliche Ursachen oder menschliche Tätigkeit) verbessert werden.

- (b) Die "decision-makers" sollen in der Planung und Koordinierung von klimaempfindlichen Tätigkeiten des Menschen, die von wirtschaftlicher und sozialer Bedeutung sind, unterstützt werden.

Am Beginn des WKP soll eine Welt-Klima-Konferenz (WKK) stehen, die im Februar 1979 in Genf stattfinden wird. Hierzu sind einige andere UN-Sonderorganisationen, wie UNEP, WHO, FAO usw. zur Mitarbeit eingeladen.

In engem Zusammenhang mit der Tätigkeit der WMO auf klimatologischem Gebiet stehen schon seit einigen Jahren die Aktivitäten auf dem Umweltsektor, dies in enger Zusammenarbeit mit UNEP. Das besondere Interesse dieser beiden Organisationen gilt dem "Global Environmental Monitoring System"; auch bei der Weiterentwicklung umweltfreundlicher neuer Energiequellen (Solar- und Windenergie) werden beide Organisationen eng zusammenarbeiten. An dem Aufbau eines "Background Air Pollution Monitoring Network" (BAPMoN) soll weitergearbeitet werden.

Die Zusammenarbeit mit den Nutznießern der angewandten Klimatologie wird sich konzentrieren auf: Energieversorgung, urbane und regionale Landnutzung, Technik und Bauwesen, menschliche Siedlungen, Tourismus, Verkehrswesen sowie auf medizinmeteorologische Probleme.

Niederschlags-Erhöungs-Projekt

Auf der 29. Sitzung des EC (1977) wurde vorgeschlagen, ein großräumiges

und sich über mehrere Jahre erstreckendes Projekt zur Untersuchung der Möglichkeit einer Niederschlags-erhöhung durchzuführen. Das Experiment soll in einem 10 000 qkm großen, noch näher zu bestimmenden Gebiet in Spanien stattfinden. Die Wolkenimpfungen selbst werden sich über den Zeitraum von 1982 bis 1987 erstrecken. Ein weiteres Jahr wird für die Auswertung der Daten benötigt. Das Projekt wird daher frühestens 1988 abgeschlossen sein.

(Auszug aus dem Bericht der Ständigen Vertretung der Bundesrepublik Deutschland bei den Internationalen Organisationen in Genf vom 26.6.1978 über die XXX. Sitzung des EC.)

Das interessante Satellitenbild

Saharastaubwolke über dem Nordatlantik beobachtet mit METEOSAT Bildern

Verschiedene Autoren untersuchten Saharastaub über dem Nordatlantik, den sie sowohl durch in-situ Messungen als auch durch quantitative Auswertung von Satellitendaten nachweisen konnten (z.B. GRINGEL und MÜHLEISEN, 1978; KÖPKE, 1977). In der vorliegenden Serie von Bildern eines geostationären Satelliten wurde

erstmalig das Ausbreiten einer Saharastaubwolke *nach Norden* bis in subtropische Breiten des Nordatlantik beobachtet. Ein aus dieser Serie ausgewähltes Bild zeigt Abbildung 1.

Das Bild ist im sichtbaren Spektralbereich vom europäischen Satelliten METEOSAT am 22.03.1978 um 14.55 GMT aufgenommen worden. Auf dem Bild sieht man westlich von Dakar ein sich weit über den Atlantischen Ozean erstreckendes aufgehelltes Gebiet, wel-



Abb. 1: METEOSAT-Aufnahme, 22.03.1978, 14.55 GMT

ches durch eine ausgedehnte Staubwolke verursacht wird. In den Abbildungen 2 bis 5, den Wetterkarten vom 22. bis 24.03.1978, ist jeweils das Gebiet schraffiert gekennzeichnet, das auf den Satellitenbildern als Staubwolke identifiziert wurde. Auf dem Kontinent kann man wegen der höheren Bodenreflexion die Staubwolke nicht weiter verfolgen. Man muß bei dieser Darstellung berücksichtigen, daß die Wetterkarten von 00 GMT sind, die Staubwolke dagegen um 14.55 GMT des Vortages, also etwa neun Stunden früher aufgenommen wurde. Die Bodenstationen in dem schraffierten Gebiet bestätigen mit ihren Meldungen des aktuellen Wetters und des Wetterverlaufs (S, \$: Staub; ∞: trockener Dunst; †: Staub- oder Sandtreiben), daß es sich tatsächlich um eine Staubwolke handelt und nicht etwa um Nebel (s. Abb. 2 und 3, S. 60).

Im folgenden wird allein anhand der Wetterkarten eine Deutung für die Form und die Ausbreitung der Staubwolke gegeben. Beides kann auf den Satellitenbildern sehr schön beobachtet werden. Die größte Ausdehnung der Staubwolke beträgt ca. 2 200 km und zwar sowohl in nord-südlicher als auch in ost-westlicher Richtung (Abb. 4 und 5). Diese große Ausdehnung berechtigt zu der Annahme, daß dieses Phänomen zu einer Erhöhung der Albedo des Systems Erde plus Atmosphäre in diesem Gebiet führt und damit den Strahlungshaushalt beeinflußt. Eine andere meteorologische Auswirkung der Staubwolke könnte sein, daß ein Teil der löslichen Partikeln als zusätzliche Kondensationskeime wirkt und einen Einfluß auf den Prozeß der Wolkenbildung hat.

Der aufgewirbelte Saharastaub wird mit den Bodenwinden (Nord-Ost-Passat) in südwestliche Richtung auf den

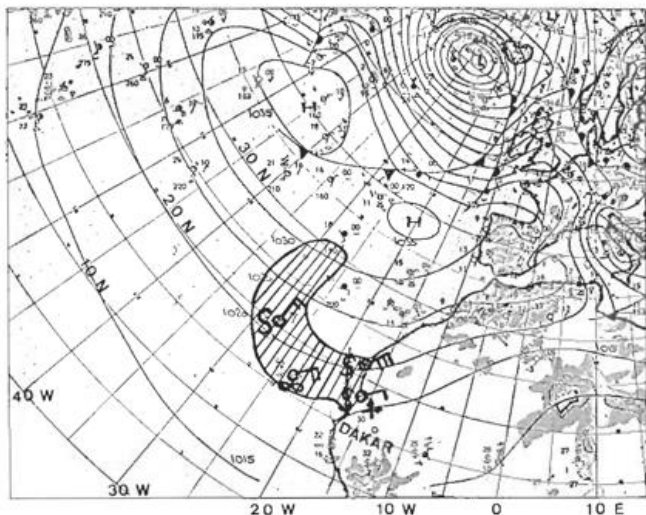


Abb. 2: Bodenkarte vom 22.3.1978, 00 GMT

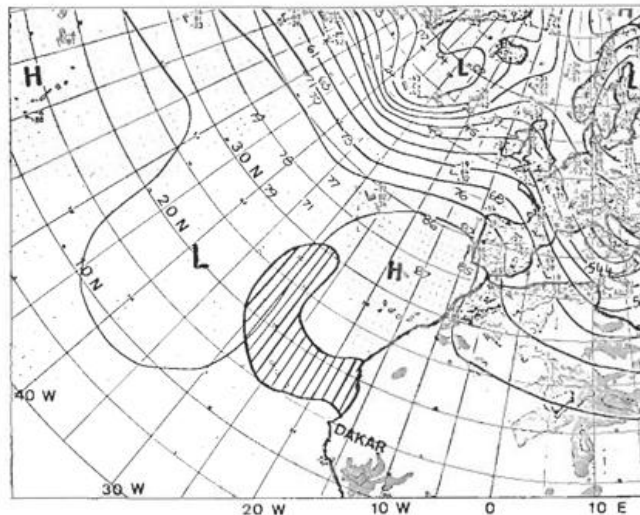


Abb. 3: 500-mbar-Karte vom 22.3.1978, 00 GMT

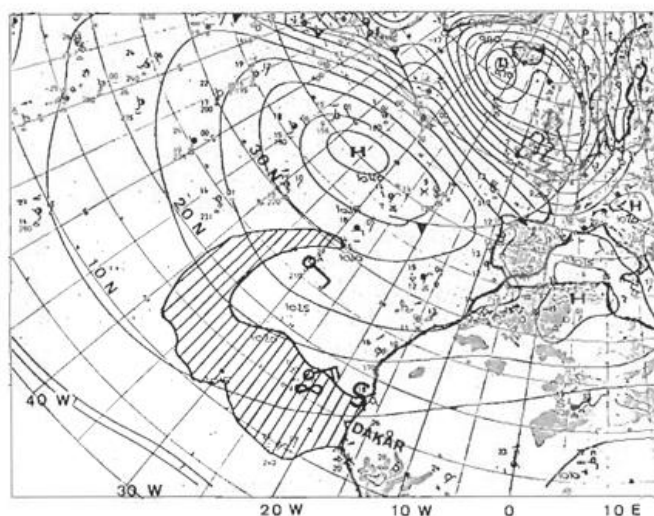


Abb. 4: Bodenkarte vom 23.3.1978, 00 GMT

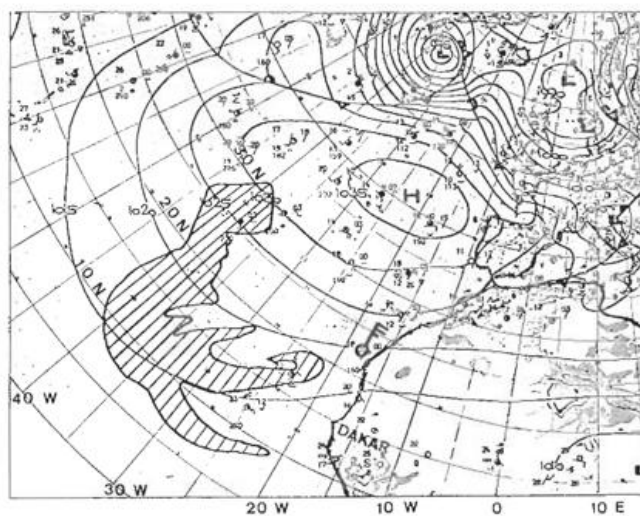


Abb. 5: Bodenkarte vom 24.3.1978, 00 GMT

Atlantik transportiert. Auf dem Atlantik beeinflusst ein kräftiges Azorenhoch die Verlagerung der Staubwolke. Sie wird durch das Hochdruckgebiet an dessen Südflanke nach Westen gesteuert. Man darf annehmen, daß während des Staubtransports die schweren Partikeln ins Meer sedimentieren, so daß mit zunehmender Entfernung von der Staubquelle (Sahara) überwiegend kleine Staubpartikeln vorhanden sind (SCHÜTZ, 1977). Westlich 25° W breitet sich die Staubwolke nach Norden aus. Da am Boden die Winde aus dem Hoch herauswehen, kann diese Verlagerung nicht mehr mit den Bodenwinden erfolgen. Nach PROSPERO (1977) breitet sich der Staub über dem Nordatlantik bis in Höhen von 5 bis 7 km aus. Zur Erklärung der Nordwärtsverlagerung der Staubwolke wird deshalb die 500-mbar-Karte (Abb. 3) ver-

wendet. In 500 mbar befindet sich über dem Nordatlantik ein großer Trog mit der Trogachse bei 40° W. Mit den südlichen Höhenwinden auf der Trogvorderseite werden die Staubpartikeln nach Norden transportiert. Die sichelförmige Ausdehnung des Staubgebietes stimmt mit der Richtung der Höhenwinde in 500 mbar gut überein. Die Abbildung 4 zeigt die zum Satellitenbild (Abb. 1) gehörige Bodenkarte. Der Verlauf der Isobaren zeigt deutlich, daß der Teil der Staubwolke, der nördlich 17° N liegt, nicht mehr durch die Bodenwinde verlagert sein kann. Die Staubwolke wird mit einer "easterly wave" weiter nach Westen verfrachtet. Am 24.03.1978 (Abb. 5) hat sich das Bodenwindssystem in Küstennähe auf nördliche Winde umgestellt, so daß eine weitere Zufuhr von Staubpartikeln unterbrochen wird und die Staub-

wolke von der afrikanischen Küste abgenabelt wird. Die Westwärtsbewegung der Staubwolke hält an, allerdings mit einer zum Vortag verminderten Geschwindigkeit. Außerdem wird sie durch den aus dem Azorenhoch herauswehenden Ost- bis Nordostwind auf ihrer Ostseite stark zerfasert.

Zusammenfassend läßt sich folgendes sagen: Das Azorenhoch und eine "easterly wave" steuern die Staubwolke über dem Nordatlantik nach Westen und nicht, wie man bei dem über Afrika und dem Atlantik herrschenden Nord-Ost-Passat erwartet, in die inner-tropische Konvergenzzone. Sie muß sich über dem Nordatlantik in größeren Höhen befinden als vor der afrikanischen Küste, da sich ihre Ausbreitung ab ca. 25° W nicht mehr mit den Bodenwinden erklären läßt.

Literatur

GRINGEL, W.; MÜHLEISEN, R.

Sahara dust concentration in the troposphere over the North Atlantic derived from measurements of air conductivity. Beitr. Phys. d. Atm. 51 (1978) S. 121–128.

KÖPKE, P.

Bestimmung der atmosphärischen Trübung mittels geostationärem Satelliten. Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München Nr. 30 (1977).

PROSPERO, J.M.

Dust concentration in the atmosphere of the equatorial North Atlantic. Science 196 (1977) S. 1196–1198.

SCHÜTZ, L.

Saharan dust transport in the NE-trade wind region over the North Atlantic Ocean. In: Proc. of the Symp. on Radiation in the Atmosphere, 19.–28. August 1976. Ed. by BOLLE. Princeton: Science Press 1977.

M. u. W. KÄSTNER, München, Offenbach

Institute stellen sich vor

Habilitationen, Promotionen und Diplom-Hauptprüfungen im Fach Meteorologie an den Universitäten der Bundesrepublik Deutschland und West-Berlins im Jahre 1977

Freie Universität Berlin

Promotion

REIMER, E.

Untersuchung zur Vorhersage charakteristischer synoptischer Strukturen mit Hilfe eines numerischen Modells der feuchten Atmosphäre.

Diplom-Hauptprüfung

BEHLAU, A.

Eine Anwendung optimaler Interpolation auf Θ -Flächen zur Berechnung großräumiger Energiebilanzen in niederen Breiten.

DÖPKE, K.

Der vertikale Transport von Geopotential in zeitlichem Zusammenhang mit Stratosphärenwärmungen.

JUERGENS, C.

Das BJERKNESsche Modell des pazifischen, ozeanisch-atmosphärischen Rückkopplungssystems – eine Überprüfung anhand neuerer Literatur.

KNITTEL, J.

Ein Beitrag zur Klimatologie der Stratosphäre der Südhalbkugel.

KÖNIG, Th.

Zur Klimatologie des Arbeitstages (07 – 16 Uhr) in Berlin.

NYC, J.

Grundlagen und Aspekte des Mikroklimas von Wohnhöfen.

ROHNER, H.

Beschreibung und Übernahme des "University of Virginia Mesoscale Model" sowie eine exemplarische Anwendung auf das norddeutsche Küstengebiet.

STROBEL, B.

Versuch einer regelungstechnischen Beschreibung von meteorologischen Phänomenen.

TIMM, B.

Untersuchung des Zusammenhanges zwischen meteorologischen Faktoren und SO_2 -Immissionen anhand von Messungen aus dem Raum Düsseldorf.

TONN, W.

Mit elektronischer Datenverarbeitung berechnete Verlagerung von Wolkenstrukturen aus dem Scanning-Radiometer (SR-)Daten der amerik. Wetter-satelliten der NOAA-Serie.

WEBER, G.-R.

Über Strukturen und Vertikalzirkulation an einer Folge von Okklusionsfronten in Mitteleuropa.

Universität Bonn

Promotion

KREUELS, R.

Strukturanalyse und Statistik des Niederschlages auf einminütiger Kurzzeitmeßbasis und das Problem der indirekten Niederschlagsbestimmung mittels Radar.

Diplom-Hauptprüfung

HACKER, J.

Vertikaler Drehimpulstransport durch Eddies über der Nordhalbkugel.

HACKER-THOMAE, S.

Ein stationäres, zonal gemittelttes Zwischenschichten-Modell der jahreszeitlichen Zirkulation in der Passatgrundschicht.

PISTORIUS, H.-J.

Ein optimiertes Rechenverfahren zur Bestimmung des vertikalen Profils der integralen Strahlungsbilanz und der Strahlenerwärmung der Atmosphäre.

RAATZ, W.

Räumliche Korrelationen und Variabilität der Niederschläge auf Sri Lanka und Südindien (Nilgiris).

Technische Universität Braunschweig

Promotion

RIESEBIETER, W.

Dreidimensionale Modellrechnungen zum solaren Wind.

Diplom-Hauptprüfung

KESSELS, W.

Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einer Kugelsonde für in situ Wärmeleitfähigkeitsmessungen.

RIFFERT, H.

Numerische Simulation von Wellen in Plasma: Beschreibung und Anwendung eines eindimensionalen Plasmamodells.

Technische Hochschule Darmstadt*Diplom-Hauptprüfung*

BRÜCHER, L.

Numerische Simulation der Ausbreitung von Abluft aus Kühltürmen.

DREIER, M.

Versuch eines Nachweises des José-Zyklus der Sonnenaktivität in langjährigen Temperaturreihen.

KIRSTEIN, H. J.

Zur Entstehung longitudinaler Wirbelrollen in einer Grenzschichtströmung über erwärmtem Erdboden.

WALLBAUM, F.

Untersuchungen zur Strömung über gebirgigem Gelände mittels eines meso-skalierten, nicht-hydrostatischen Modells (Version I: Homogenes Medium).

Universität Frankfurt a.M.*Promotion*

SCHMITT, R.

Globale Untersuchungen des Kohlendioxid-Konzentrationsfeldes mittels eines neuentwickelten Meßgerätes.

Diplom-Hauptprüfung

BETZ, M.

Untersuchungen über die Absorption und Oxidation von Schwefeldioxid in natürlichem Regenwasser.

BINGEMER, H.

Transport und Abbau schwefelförmiger Luftverunreinigungen im Lee grosser Flächenquellen.

LENHARD, U.

Messungen und Ammoniak in der unteren Troposphäre und Untersuchung der NH₃-Quellenstärke von Böden.

MALEWSKI, H.

Untersuchung der Konzentrationsverteilung von Schwefelwasserstoff in der bodennahen Luftschicht.

NOTTRODT, K.-H.

Vergleich der Spurenanalyse von Schwermetallaerosolen mittels Atom-Absorptions-Spektroskopie und protoneninduzierter Röntgenspektroskopie.

Universität Hamburg*Diplom-Hauptprüfung*

BARGEN, D. v.

Berechnung von Wolkenparametern aufgrund der ATEX-Daten mit Hilfe eines eindimensionalen Modells (Nach Yanai et al., 1973).

GOLCHERT, H.-J.

Strahlungsübertragung in vertikal inhomogenen Wolken.

KLÖPPEL, M.

Zusammenhang zwischen Wind- und Temperaturfluktuationen und der Schallrückstreuung.

MARTENS, G.-H.

Statistische Untersuchung der Arbeitsleistung des Druckfeldes mit Hilfe der Daten des aerologischen Aufstiegsnetzes über den Britischen Inseln.

Technische Universität Hannover*Diplom-Hauptprüfung*

BEYER, R.

Wärmehaushaltsberechnungen für GREIV I.

DRIFTMEYER, K. D.

Vergleich des Windes in Hannover-Langenhagen, Hannover-Herrenhausen und Ruthe für die Jahre 1967-1974 in Abhängigkeit von Luftmassen, Stabilität und geostrophischem Wind.

GLAWE, N.

Eine Übersicht über die Parametrisierungsverfahren subskaliger Prozesse in numerischen Modellen zur Cumulus Konvektion.

HEINISCH, S.

Nebelvorsage.

KARNETZKI, D.

Einfache Ansätze zur Beschreibung der Energetik der Passatinversion über der Sahara im Winter.

KOSCHNICK, W.

Ein Überblick über die CISK-Theorie, einem Versuch zur Erklärung tropischen Störungswachstums.

KOTTMEIER, Ch.

Die Low Level Jet-Situation während des Experiments GREIV I.

KUHR, K. D.

Klimatologische Probleme, dargestellt an einigen Modellversuchen der Literatur.

LEGE, D.

Die Bestimmung der Schubspannungsgeschwindigkeit und des Stromes fühlbarer und latenter Wärme aus den integrierten Profilleichungen.

MELCHIOR, J.

Bestimmung von Trajektorien in verschiedenen Höhen zur Feststellung der Passatinversionen über Nordafrika.

Universität (TH) Karlsruhe*Diplom-Hauptprüfung*

DORN, S.

Orographisch bedingter Windverlauf im Gebiet Leopoldshafen-Philippshafen.

Universität Kiel*Diplom-Hauptprüfung*

CUBASCH, U.

Spektrale des Windes über Land und über Meer im Periodenbereich von 1 Minute bis 1 Tag.

JECKSTRÖM, W.

Eine Entwicklung des Geopotentialfeldes der 500-mbar-Fläche im Winter der Nordhalbkugel in natürliche Orthogonalfunktionen und eine Interpretation der Ergebnisse im Zusammenhang mit tatsächlichen synoptischen großskaligen Wetterlagen.

KAMINSKI, U.

Klassifikation der Wetterlagen über dem Wetterschiff C durch vertikale natürliche Orthogonalfunktionen.

KIRK, E.

Objektive Analysen meteorologischer Parameter über der Kieler Bucht.

RIECKE, W.

In der Meteorologie benutzte objektive horizontale Analysenverfahren im Hinblick auf die Anwendung bei wissenschaftlichen Untersuchungen.

SIERTS, H.-W.

Meteorologische Einflüsse auf das Auftriebsgebiet vor Nordwestafrika.

Universität Köln

Promotion

JUNG, M.

“Zur Untersuchung von Luftdruckschwankungen”. Ein Beitrag zur Problematik der thermischen Erzeugung von Turbulenzenergie.

Diplom-Hauptprüfung

BAHMANN, W.

Sondierungen von Inversionen im Stadtgebiet von Köln mittels einer Grenzschichtsonde (Eigenbau).

BEHNKE, W.

Abhängigkeit des Windfeldes und der SO₂-Konzentration über der Stadt Köln und Umgebung von der großräumigen Wetterlage.

HÖLLER, H.

Die Berechnung der Verdunstung eines Sees im subtropischen Trockengebiet.

SCHMETZ, J.

Bewölkung und Strahlungshaushalt – Untersuchung des Zusammenhangs anhand von Messungen während des Fladengrund-Experiments (Flex) 1975/76.

Universität Mainz

Promotion

SCHÜTZ, L.

Die Saharastaub-Komponente über dem subtropischen Atlantik.

THUDIUM, J.

Über den Flüssigwassergehalt und die Größe atmosphärischer Aerosolteilchen im Bereich hoher relativer Luftfeuchtigkeiten.

Diplom-Hauptprüfung

DLUGI, R.

Untersuchung eines Verfahrens zur Bestimmung des mittleren Absorptionsindex von Proben atmosphärischer Aerosolteilchen.

GRAMINSKI, R.

Die diagnostische und prognostische Behandlung der lokalen Geschwindigkeitsdyade.

HÄFFNER, D.

Wärmegleichungen.

MÜLLER, F.

Das Verhalten der Chlorfluormethane in der unteren Atmosphäre.

SCHREIBER, B.

Überprüfung einer semiempirischen Regel für die Wasseraufnahme von Salzmischungen.

TANGERMANN, G.

Numerische Modellrechnungen zur Abschätzung des Einflusses verschiedener Parameter auf die turbulente Diffusion von Luftverunreinigungen.

WULLBRANDT, H.

Über das abgehobene Temperaturminimum.

Universität München

Promotion

KÖPKE, P. C.

Bestimmung der atmosphärischen Trübung mittels geostationärem Satelliten.

Diplom-Hauptprüfung

HILL, M.

Windbestimmung aus Satellitenmessungen in der 6,3 μ m Wasserdampfbande.

KIRCHNER, M.

Anthropogene Einflüsse auf die Oberflächenalbedo und die Parameter des Austausches an der Grenze Erde/Atmosphäre.

LANG, P. F. W.

Analyse starker Lufttrübungen mit Hilfe von LANDSAT-Bildern.

Problem- und Diskussionsecke

Eine heilige Kuh ist schlachtreif – die Sprache der Meteorologen

Eines haben Wetterberichte heute gemeinsam, ob sie nun telegraphmartig verstümmelt oder in epischer Breite dargestellt werden: sie sprechen alle die gleiche Sprache. – Gott sei Dank, wird man meinen. Wie sollen wir uns sonst verständigen? – Nun, verständigen wir uns denn? Ich meine, versteht der Leser oder Zuhörer eines Wetterberichtes den Meteorologen?

Beim Studium von Wetterkarten des vorigen Jahrhunderts fiel mir auf, daß verblüffende Übereinstimmungen in der Sprache der Meteorologen von damals und heute bestehen. Berücksich-

tigt man dabei, daß seit Erscheinen der ersten Wetterkarten über 100 Jahre vergangen sind, so gibt das wohl zu denken!

Gerade liegt eine Wettervorhersage vor mir:

“An der Küste Fortdauer der veränderlichen Witterung mit Neigung zu Niederschlägen bei leichter, vorwiegend westlicher Luftströmung, im Binnenlande ruhige aber meist trübe Witterung mit umlaufenden Winden, keine wesentliche Änderung der Temperatur.”

Was mir an dieser Vorhersage bemerkenswert erscheint, ist lediglich das Datum: die Vorhersage gilt für einen Tag im Jahre 1877 und wurde von Dr. NEUMAYER verfaßt (siehe auch Promet 4' 76).

Die Erkenntnis, daß diese Vorhersage aus dem Jahre 1877 ganz genauso für einen Tag in diesem Jahr bestimmt sein könnte, weil Vorhersagen eben heute genau in der gleichen Sprache geschrieben werden, beschämt etwas.

Als einer der großen Literaten seiner Zeit (als die ersten Wetterkarten von

der Seewarte herausgegeben wurden) gilt wohl FONTANE, dessen Werke heute an den Gymnasien Standardliteratur sind, wenn der Impressionismus durchgenommen wird. Man vergleiche einmal die Sprache Fontanes mit der eines heutigen Literaten, etwa BÖLL, BRECHT oder GRASS. Niemand wird auch nur im entferntesten darauf kommen, daß diese Männer die gleiche Sprache sprechen würden wie FONTANE. Für die Wissenschaft gilt nichts anderes, man lese nur einmal in den Originalen nach.

Lediglich die Sprache der Meteorologen hat sich seit über 100 Jahren unverändert gehalten. Sie wird schließlich entsprechend gehegt und gepflegt – eine wahrlich konservative Größe.

Wie steht es nun um die Verständigung? Können die Kunden eine Sprache verstehen, die vor vielen Generationen gesprochen wurde? Wohl kaum! Nun ist es auch kein Einzelfall, den ich aus purer Boshaftigkeit herausgepickt habe – man lese nach bei NEUMAYER, van BEBBER, KÖPPEN etc.

Aus historischer Sicht sind die berühmten Kollegen "aus dem Schneider"; schließlich produzierten sie diese Sprache. Wie steht es um die, die sie heute nur noch reproduzieren?

Uns Meteorologen sind die Ausdrücke, die wir verwenden, eng vertraut. Allerdings erwarten wir, daß die Öffentlichkeit genau dasselbe darunter versteht – unglücklicherweise tut sie das nicht. Wir machen es uns einfach zu leicht, wenn wir annehmen, daß das, was wir sagen, schon irgendwie verstanden wird. Abgesehen davon, daß die oft gehörten Fachausdrücke gelegentlich arg langweilig erscheinen und zudem von einem armseligen Stil begleitet sind. So hat die Öffentlichkeit nur wenig Gelegenheit, das Anliegen des Verfassers der Vorhersage wirklich zu verstehen. Eine amerikanische Untersuchung des National Weather Service hat ergeben, daß die Massenmedien, die schließlich viel von dem Material der Meteorologen verwenden, die sprachliche Qualität der Vorhersagen als dürftig bezeichnen. Es bedarf eines erheblichen Aufwandes, die Wetterberichte zu verbessern. Nachrichtensprecher haben ein besonders großes Problem mit den Vorher-

sagen: sie können sich nicht den Luxus leisten und die Vorhersagen sprachlich aufpolieren, da sie unter großem Zeitdruck arbeiten und oft sogar aus dem Stegreif sprechen müssen. Hierbei entsteht ein Problem besonderer Art, wenn Journalisten unsere Vorhersagen sprachlich verbessern wollen. Oftmals wird dabei unbemerkt die Aussage verändert. Das bedeutet letztlich, daß die Bevölkerung eine ganz andere Information erhält als der Synoptiker beabsichtigte.

Meteorologen sprechen viel über Vorhersageprobleme, Daten, Computer, Modelle, Satelliten usw. Allerdings sollten wir neben diesen noch so wichtigen Dingen eines nicht vergessen: Die Aufgabe der meisten Meteorologen ist es, anderen Menschen zu erläutern, wie das Wetter ist oder werden wird. Unser Erfolg und unsere Glaubwürdigkeit werden weitgehend daran gemessen, wie gut wir diese Aufgabe erfüllen. Meteorologen machen sich viele Gedanken über eine Vorhersage, erübrigen aber nur wenig Zeit für die Formulierung, die an die Öffentlichkeit geht. Kurz gesagt: Wir besitzen Informationen, die von der Öffentlichkeit benötigt werden, und es ist unsere Pflicht, sie so zu formulieren, daß sie verstanden und verwendet werden können.

Das Southern Regional Headquarter des National Weather Service der USA hat einmal die Wettervorhersagen sprachlich untersucht. Man fand heraus, daß viele nicht gut formuliert waren oder gar stereotyp erschienen. Sie gaben kaum die Informationen weiter, die dem Synoptiker zur Verfügung standen. Aus dieser Erkenntnis heraus entschloß man sich, einen journalistischen Experten zu konsultieren. Er wurde beauftragt, die Vorhersagen auf Eindeutigkeit der Aussage, Stil und schlechte Schreibgewohnheiten zu untersuchen. Am Ende stand das Ziel, einen Kursus für Meteorologen einzurichten, in dem gelehrt werden sollte, wie die Gesetze des Journalismus auf die Routinevorhersagen angewendet werden können. Diese Idee ist sicher nachahmenswert!

Die Amerikaner zogen die verschiedensten Medien zu Rate, wie z. B. die Nachrichtenagenturen UPI und AP sowie die Vertreter von Radio- und Fernsehstationen. Alle wurden gefragt, welche Ideen sie zur Verbesserung von Wetterberichten beisteuern könnten. Die Kommentare der Medien waren

doch recht bezeichnend. Viele meinten, daß gerade das, was die Bevölkerung am meisten interessiert, zu kurz kommt. Man möchte viel mehr über Niederschläge und Temperaturen informiert werden als über die Bewölkung. Alle Vorhersagen beginnen mit der Bewölkung – sie sind sogar überladen mit detaillierten Informationen über die zu erwartende Art und Veränderung der Bewölkung. Niederschlagsgebiete für ein großes Gebiet, die mit einer einzigen Linie abgetan werden, wurden ebenfalls kritisiert. Es ist das Problem, die Lage von Fronten darzustellen. Wir müssen gut bekannte geographische Bezeichnungen verwenden, anders wird die Bevölkerung nicht verstehen, ob sie in einem Regengebiet sein wird oder nicht. Dabei genügt es sicher nicht, von einer Linie "Hamburg bis München" zu sprechen.

Viele Medienvertreter betonten die Notwendigkeit, die wichtigste Wettererscheinung an den Anfang zu stellen. Sie meinten, daß die wichtigen Informationen oft im Verborgenen stecken. Ein Programmdirektor meinte: "Die Hörer wollen die entscheidenden Fakten zuerst, andere Informationen können folgen."

Bezüglich des sprachlichen Niveaus meinten die Medienvertreter, daß die Meteorologen gelegentlich vergessen, für wen sie überhaupt die Vorhersagen machen. Auch wird eine Sammlung von Lieblingsformulierungen und Standardworten verwendet, die den Meteorologen wohlvertraut sind, der Öffentlichkeit aber so gut wie gar nichts sagen. Einige Formulierungen wecken sogar den Anschein, als sollten sie unsere Ungewißheit über die Wetterentwicklung lediglich überdecken.

Die Lösung vieler dieser Probleme ist eine bessere, das heißt journalistisch geschulte Formulierung der Wettervorhersagen und ein zunehmendes Eingehen auf die Bedürfnisse der Kunden.

D. KARNETZKI, z.Z. Neustadt/Weinstraße

Literatur

ANDERSON, W.R.

Communication and the weather. In: Conf. on Hydro-Meteorology. Apr. 20–22, 1976, Fort Worth, Texas. Boston /MA 1976. S. 102–103.

Anschriften der Autoren der Beiträge für das Thema dieses Heftes:

Prof. Dr. Hermann Flohn
Meteorologisches Institut der Universität Bonn
Auf dem Hügel 20
5300 Bonn 1

Prof. Dr. Christian Junge
Max-Planck-Institut für Chemie
(Otto-Hahn-Institut)
Postfach 3060
6500 Mainz

Prof. Dr. Albert Baumgartner
Dipl.-Met. Manfred Kirchner
Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie
der Universität München
Amalienstr. 52
8000 München 40

Dr. H. Mayer
Institut für Meteorologie der Forstlichen Forschungsanstalt
München
Amalienstr. 52
8000 München 40

Manuskriptsendungen werden erbeten an:

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