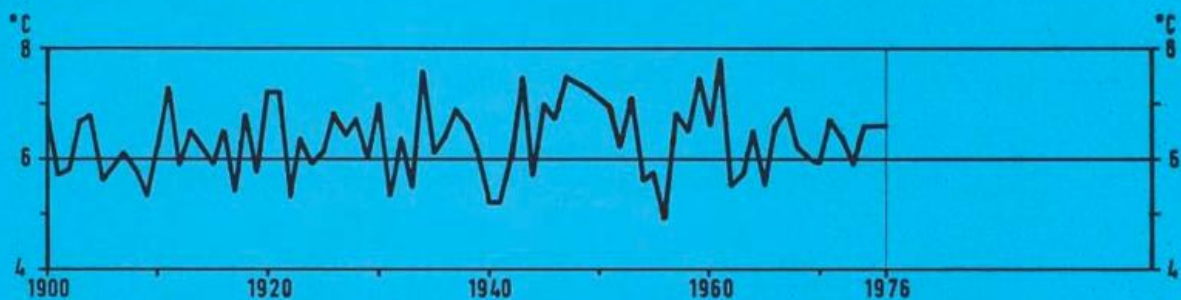
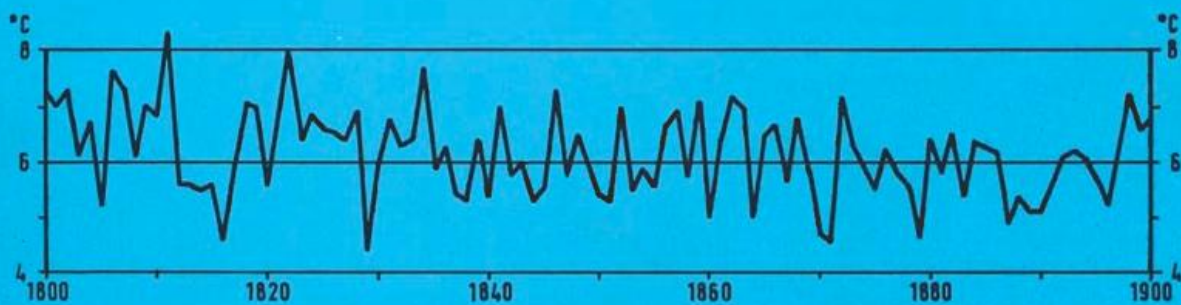
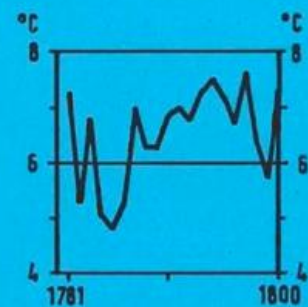


Klimaschwankungen

Jahresmitteltemperaturen (°C)
Hohenpeißenberg 1781 - 1976



Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleitung (Heft 4'77)

M. Schlegel

Unter Mitarbeit von

R. Ullmann

Frankfurter Straße 135

6050 Offenbach (Main)

Redaktionsausschuß

F. Defant (Kiel)

H.-W. Georgii (Frankfurt)

K. H. Hinkelmann (Mainz)

H. Hinzpeter (Hamburg)

E. Lingelbach (Offenbach)

H. Reiser (Offenbach)

M. Schlegel (Offenbach)

H.-P. Schmitz (Berlin)

S. Uhlig (Traben-Trarbach)

F. Wippermann (Darmstadt)

Zum Titelbild:

Klimaschwankungen hat es zu allen Zeiten gegeben. Eindeutig belegt wird diese Tatsache durch die langen Reihen instrumenteller Beobachtungen (vgl. Abb. 3, S. 5 in diesem Heft). Auch die langjährige Temperaturreihe auf dem Hohenpeißenberg (Obb.), wo sich seit 1781 die älteste Bergstation der Erde mit ununterbrochenen Beobachtungen befindet, läßt deutlich kältere und wärmere Perioden erkennen.

Das langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur beträgt dort 6,3 °C.

promet erscheint vierteljährlich im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes — Zentralamt — Frankfurter Str. 135, 6050 Offenbach (Main). Bezugspreis DM 28,— pro Jahrgang, Einzelheft DM 7,50.

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

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

Thema dieses Heftes

Klimaschwankungen

Beiträge

Seite

MASON, B. J.

- 1 Zum Verständnis und zur Vorhersage der Klimaschwankungen

1

WELTORGANISATION FÜR METEOROLOGIE

- 2 Technischer Bericht der Expertengruppe des WMO Executive Committee über Klimaveränderungen

22

Aus dem Deutschen Wetterdienst

25 Jahre Deutscher Wetterdienst (W. HORST)

26

Das interessante Satellitenbild

Erstes METEOSAT-Bild (T. MOHR)

28

Aus der Arbeit des Geophysikalischen

Beratungsdienstes der Bundeswehr

Die Nachtsichtvorhersage (I. WEISS)

29

Wichtige Neuerscheinungen

31

Ankündigungen

32

3. Umschlagseite

Klimaschwankungen

1

B. J. MASON, Bracknell

Zum Verständnis und zur Vorhersage der Klimaschwankungen

(Symons Memorial Lecture, gehalten am 17. März 1976)*

1. Einleitung

Eine der auffallendsten und wichtigsten Entwicklungen in der Meteorologie in den letzten Jahren ist das plötzlich aufkommende Interesse an dem Thema des Klimas und der Klimaänderung. Man ist sich zunehmend bewußt geworden, daß Klimafluktuationen, unvorhersagbar nach Größe und Dauer, in der Zukunft einen größeren wirtschaftlichen und sozialen Einfluß erwarten lassen und es einig Besorgnis gibt, daß der Mensch selbst unbeabsichtigte und unwiderrufliche Prozesse hervorrufen könne. Zur gleichen Zeit haben Verbesserungen in den Verfahren der paläoklimatologischen Datierung eine viel klarere Aufzeichnung der Klimageschichte der letzten Million Jahre bewirkt, während gleichzeitig die Verfügbarkeit von Rechnern, die in der Lage sind, mehr als 10 Millionen Instruktionen pro Sekunde auszuführen, die Entwicklung komplexer (obwohl noch immer über-vereinfachter) numerischer Modelle zur Simulation globaler Klimate und zur Untersuchung des wahrscheinlichen Einflusses verschiedenartiger natürlicher und vom Menschen herrührender Störungen ermutigt hat.

Obwohl ich der Meinung bin, daß die Wahrscheinlichkeit größerer und potentieller katastrophaler Änderungen des Klimas gröblich übertrieben worden ist, ist das Thema mit soviel vorstellbarer Bedeutung und auch Besorgnis verbunden, daß es ein ununterbrochen aufrechterhaltendes Forschungsprogramm verdient, das darauf gerichtet ist, die vergangenen und jetzigen Trends glaubwürdiger zu ermitteln und unser Verständnis von den zugrundeliegenden Mechanismen zu verbessern. Solch ein Programm ist als das zweite Hauptziel des Global Atmospheric Research Programme angenommen worden, über das das Joint Organizing Committee (1975) kürzlich einen ausgezeichneten Bericht angefertigt hat.

In diesem Vortrag will ich versuchen, einen Überblick über einige Probleme der Wiederherstellung und Deutung historischer Klimareihen zu geben, zu zeigen, bis zu welchem Grad die Vergangenheit einen Wegweiser für künftige Änderungen liefern kann, einige mögliche Ursachen für Klimaänderungen diskutieren und die Hoffnungen und Grenzen numerischer Modellierung zur Verständlichmachung und vielleicht gar zur Vorhersage der Weiterentwicklung des Klimas der Erde beschreiben. Obwohl die großzügigen Merkmale des globalen Klimas seit dem Ende der letzten Eiszeit vor einigen 10 000 Jahren ziemlich stabil und stationär geblieben sind, zeigen klimatologische Reihen, die auf der Zusammenfassung und statistischen Mittelung täglicher Wetterangaben von Temperatur, Niederschlag usw. beruhen, beachtliche Schwankungen von Jahr zu Jahr, von Dekade zu Dekade und von Jahrhundert zu Jahrhundert. Obwohl diese Fluktuationen im allgemeinen, verglichen mit den dramatischen Änderungen in Verbindung mit einer Eiszeit, klein sind, können sie nichtsdestoweniger bedeutende wirtschaftliche und soziale Folgen haben. Zunehmende Erdbevölkerung und der Wunsch, den Lebensstandard zu heben, haben den Druck auf die natürlichen Quellen von Nahrung, Wasser und Energie, auf das Gleichgewicht zwischen Versorgung und Bedarf verstärkt, das durch begrenzte Klimaänderungen ernsthaft beeinträchtigt werden könnte. Bei Weltgetreidereserven, die jetzt nur wenige Prozent des Jahresverbrauches ausmachen, weisen kürzliche Weizenmißernten in den UdSSR und USA als die Folge von nur zeitweisen Abschnitten ungünstiger Witterung auf die Schwierigkeiten hin, die entstehen könnten, wenn es zu einer verbreiteten und ständigen Verschlechterung des Klimas der hauptsächlich nahrungserzeugenden Gebiete käme. Leider ist unser Verständnis des Mechanismus und der Ursachen von klimatischen Trends und Fluktuationen unzureichend, um ihre Vorhersage zu erlauben. Es ist nicht einmal klar, ob sie durch interne Änderungen im atmosphärisch-ozeanischen System oder durch Änderungen äußerer Faktoren, wie etwa der Sonnenstrah-

* Der Vortrag wurde unter dem Originaltitel „Towards the understanding and prediction of climatic variations“ im Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. Vol. 102 (1976) No 433, S. 473-498 veröffentlicht und von E. SUSSENBARGER ins Deutsche übersetzt. (Mit freundlicher Genehmigung des Verfassers und der Royal Meteorological Society.)

Tab. 1 Merkmale paläoklimatischer Datenquellen

Stellvertretende Datenquelle	Gemessene veränderliche Größe	Stetigkeit der Beweismittel	Potentieller geographischer Wirkungsbereich	Untersuchungsperiode (Jahre vor Gegenwart)	Mindestabstand der Probenentnahme (Jahre)	Übliche Genauigkeit der Datierung (Jahre)	Folgerung für das Klima
Geschichtete Eisbohrkerne	Konzentration der Sauerstoffisotope, Dicke (kurze Bohrkerne)	ununterbrochen	Antarktis, Grönland	10 000	1-10	± 1—100	Temperatur, Anhäufung
Baumringe	Konzentration der Sauerstoffisotope (lange Bohrkerne)	ununterbrochen	Antarktis, Grönland	100 000 +	veränderlich	veränderlich	Temperatur
Fossile Pollen	Ringbreitenanomalie, Dichte, Zusammensetzung der Isotope	ununterbrochen	Kontinente der mittleren und hohen Breiten	1 000 (gewöhnlich) 8 000 (selten)	1	± 1	Temperatur, Abfluß, Niederschlag, Bodenfeuchte
Gebirgs-gletscher	Konzentration der Pollenarten (Bohrkerne aus Seeablagerungen)	ununterbrochen	Kontinente der mittleren Breiten	12 000	1-10	± 10	Temperatur Niederschlag Bodenfeuchte
Eisbedeckung	Konzentration der Pollenarten (normaler Kern)	ununterbrochen	50° S bis 70° N	12 000 (gewöhnlich) 200 000 (selten)	200	± 5%	Temperatur Niederschlag Bodenfeuchte
Uralte Böden	Endpositionen	gelegentlich	45° S bis 70° N	40 000	—	± 5%	Ausdehnung von Gebirgs-gletschern
Abgeschlossene Seen	Endpositionen	gelegentlich	mittlere bis hohe Breiten	25 000 (gewöhnlich) 1 000 000 (selten)	—	veränderlich	Gebiet mit Eisbedeckung
Seeablagerungen	Bodenart	gelegentlich	niedere und mittlere Breiten	1 000 000	200	± 5%	Temperatur, Niederschlag, Entwässerung
Ozeanablagerungen (gewöhnliche Tief-seekerne 2-5 cm/1000 Jahre)	Seespiegel	gelegentlich	mittlere Breiten	50 000	1-100 veränderlich	± 5% ± 1%	Verdunstung, Abfluß, Niederschlag Temperatur
	Dicke der Seeablagerungen	ununterbrochen	mittlere Breiten	5 000	1	± 5%	Temperatur, Niederschlag Windrichtung
	Asche- und Sandan-häufungsraten	ununterbrochen	Weltmeere (außerhalb der Gebiete mit rotem Ton)	200 000	500 +	± 5%	Oberflächentemperatur des Meeres, Oberflächengehalt, Ausdehnung d. Seeesises
	Zusammensetzung des fossilen Planktons	ununterbrochen	Weltmeere (außerhalb der Gebiete mit rotem Ton)	200 000	500 +	± 5%	Oberflächentemp., Volumen des Weltmeeres, Temperatur des Meeressbodens und Fluß des Wassers am Meeresboden, Chemie des Bodenwassers
	Isotopenzusammensetzung fossilen Planktons; Fossilien von Lebewesen am Meeresgrund; Zusammensetzung der Mineralien	ununterbrochen	Weltmeere (oberhalb der Ausgleichsschicht von CaCO ₃)	200 000	500 +	± 5%	wie zuvor
(Seltene Kerne >10 cm/1000 Jahre)	wie zuvor	ununterbrochen	entlang den Rändern der Kontinente	10 000 +	20	± 5%	wie zuvor
(Kerne <2 cm/1000 Jahre)	wie zuvor	ununterbrochen	Weltmeere	1 000 000 +	1 000 +	± 5%	wie zuvor
Küstenlinien der Ozeane	Küstenmerkmale, Wachstum der Riffe	gelegentlich	stabile Küsten, ozeanische Inseln	400 000	—	± 5%	Meeresniveau, Eisvolumen

lung, verursacht werden. Das Problem könnte in der überschaubaren Zukunft durch die Möglichkeit erschwert werden, daß auch menschliche Tätigkeiten durch die Erzeugung von zusätzlichem Kohlendioxyd, Aerosolen und durch Wärmeabgabe bedeutsame Änderungen des Wetters und des Klimas verursachen könnten.

2. Eine kurze Übersicht über vergangene Klimate

Eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis und Abschätzen von Klimaänderungen ist eine logisch zusammenhängende und folgerichtige Rekonstruktion der Klimageschichte der Erde, von der unsere Kenntnis außerhalb der kurzen Periode von Instrumentenbeobachtungen von nur 200—300 Jahren weitgehend auf erfindungsreiche und sorgfältige Analysen von Baumringen, fossiler Flora und Fauna in den Ablagerungen der Tiefsee, fossilen Pollen in Erdschichten, der Isotopenzusammensetzung in Eiskernen aus den polaren Eiskappen, der Änderungen des Meeresspiegels usw. angewiesen ist. Im Hinblick auf die Grenzen dieser Verfahren (siehe Tabelle) und die Tatsache, daß solche Daten nur für einige wenige Orte verfügbar sind, ist es bemerkenswert, daß ein so zusammenhängendes Bild der vergangenen Klimate daraus hervorgegangen ist, wenn gleich noch viele Lücken geschlossen werden müssen.

Zur Zeit befinden wir uns in einer interglazialen Epoche innerhalb eines Eiszeitalters, das mindestens zwei Millionen Jahre bestanden hat. Das derzeitige Eiszeitalter ist das jüngste in einer Serie von wenigstens dreien, die in Abständen von etwa 300 Millionen Jahren wärmere und eisfreie Zustände auf der Erde beträchtlich unterbrochen haben. Der Ursprung der derzeitigen Eiszeit ist nicht sicher bekannt, könnte aber gut mit der Bewegung des antarktischen Kontinents in Richtung seiner jetzigen polaren Lage vor ungefähr 50 Millionen Jahren und der allmählichen Isolierung des Nordpolarmeeres von den Ozeanen der mittleren Breiten durch die nordamerikanisch-grönländisch-eurasische Landmasse übereingestimmt haben. Beweise aus Ablagerungen in den ozeanischen Böden legen es nahe, daß das Nordpolarmeer zu allen Zeiten während der letzten Million Jahre größtenteils mit Eis bedeckt war.

Die Zeitbestimmung von Klimaten, die vor mehr als einer Million Jahren existierten, ist mit Nachweisen dürftig belegt und selbst die innerhalb der letzten Million Jahre, des Pleistozäns, ist erst in den letzten paar Jahren durch die Isotopenanalyse des fossilen Planktons in den Tiefseeablagerungen getroffen worden. Dieser Nachweis, siehe Abb. 1, zeigt acht Wechsel zwischen kalten glazialen Epochen und relativ warmen Zwischeneiszeiten, die sich in Abständen von der Größenordnung von 100 000 Jahren ereigneten. Diese Übergänge waren von großen Fluktuationen der nordhemisphärischen Eisdecken und Schwankungen des Meeresspiegels von der Größenordnung von 100 m begleitet. Die wärmsten

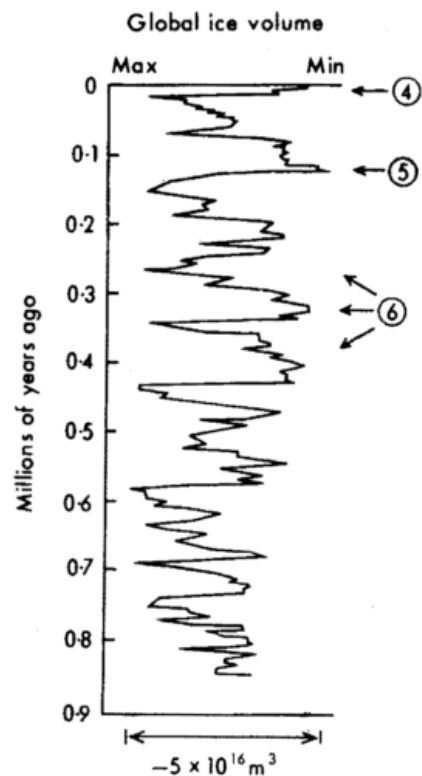


Abb. 1 Fluktuationen des globalen Eisvolumens (oder Meeresspiegels) während der letzten Million Jahre, aufgezeichnet aus Änderungen der Isotopenzusammensetzung des fossilen Planktons in einem Tiefseebohrkern aus dem äquatorialen Pazifik (SHACKLETON und OPDYKE 1973)

Abschnitte der Zwischeneiszeiten, so wie wir derzeit eine durchmachen, haben nur etwa 10 000 Jahre ange dauert und die Übergänge von glazialen zu interglazialen Perioden sind gewöhnlich kürzer (~ 2000 Jahre) als jene von interglazialen zu glazialen (5—10 000 Jahre) gewesen. Es gibt jedoch einige neuere Beweise dafür, anzunehmen, daß die Anfangsphase des Übergangs zu einer Glazialzeit sehr kurz sein könnte, vielleicht nur einige hundert Jahre. Der Übergang von den wärmsten Abschnitten einer Zwischeneiszeit zu einer voll entwickelten Eiszeit wird von einem mittleren globalen Temperaturfall von etwa 10°C und einer dreifachen Zunahme des gesamten Eisvolumens begleitet, aber die letzte kalte Epoche wurde durch fünf markante Fluktuationen mit einer Amplitude von $3\text{--}5^\circ\text{C}$ unterbrochen, die wärmere und kältere Abschnitte (Zwischenabschnitte) in Abständen von etwa 20 000 Jahren lieferten — siehe Abb. 2. Außerdem zeigen die Reihen Schwankungen in Zeitskalen, die von 20 000 bis zu weniger als 100 Jahre reichen, von denen einige von bemerkenswert großer Amplitude und kurzer Dauer sind.

Während der vergangenen 20 000 Jahre waren einige der Änderungen ebenso stark wie einige, die sich während der letzten Million Jahre ereigneten. Zur Zeit des letzten glazialen Maximums, vor etwa 18 000 Jahren,

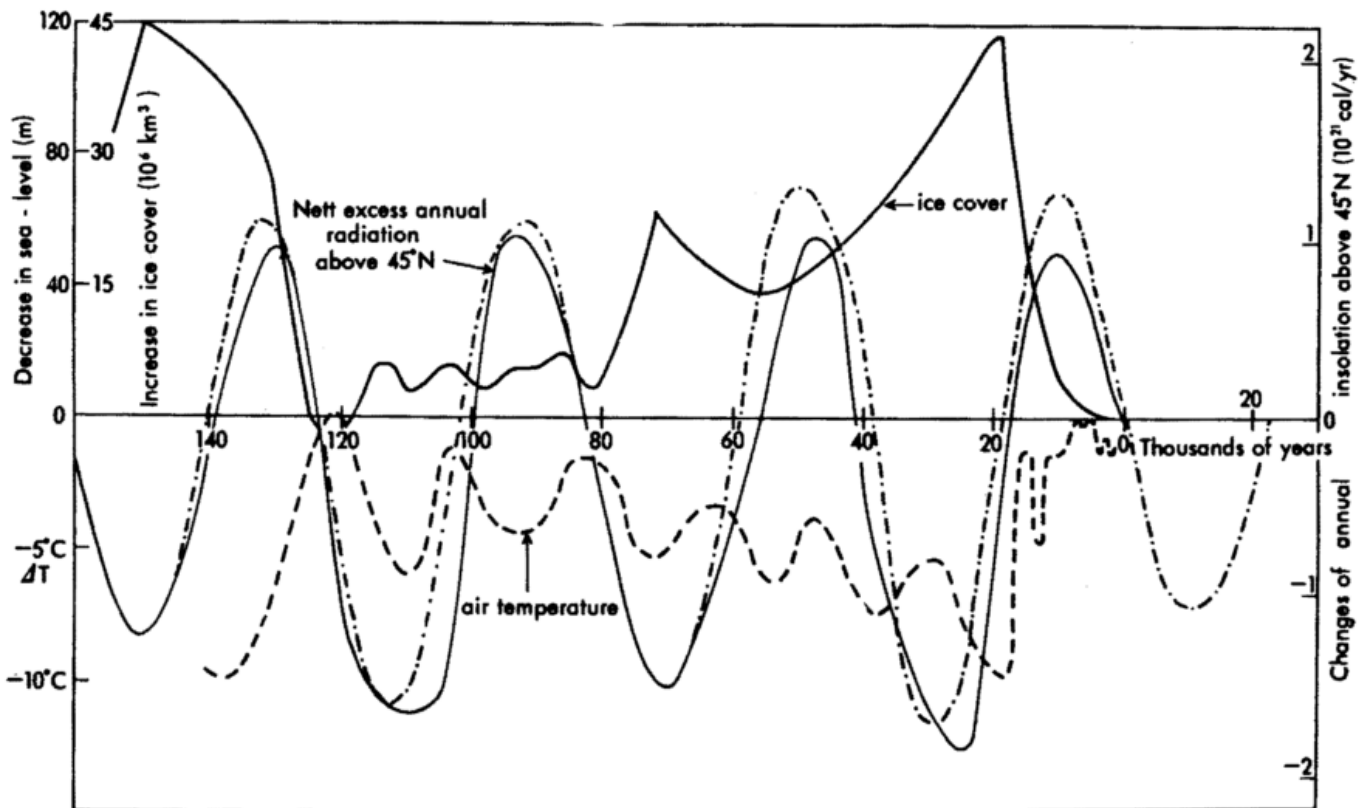


Abb. 2 Änderungen der globalen Eisbedeckung, der Lufttemperaturen der Nordhalbkugel und der gesamten Einstrahlung nördlich von 45°N während der letzten 150 000 Jahre

waren ausgedehnte Gebiete der Nordhalbkugel mit kontinentalen Eispanzern überdeckt, wobei der Meeresspiegel etwa um 120 m und die Oberflächentemperaturen des Nordatlantik um nicht weniger als 10 °C seit dem klimatischen Optimum 120 000 Jahre vor der Gegenwart gefallen waren. Während des Rückzugs der nordamerikanischen Eisdecke, die sich auf etwa 8000 Jahre zwischen 14 500 und 6500 Jahre vor der Gegenwart erstreckt, ereignete sich eine Folge von fünf abwechselnd warmen und kalten Zwischenzeiten mit Amplituden bis zu 6 °C innerhalb weniger als 2000 Jahren über Grönland und einem großen Teil von Nordamerika und hinterließ ihre Merkmale bis in den Mittelmeerraum. Das letzte interglaziale Maximum wurde etwa 6000 Jahre vor der Gegenwart erreicht und seitdem erfahren die Klimate eine allmähliche Abkühlung. Dieser Trend wurde durch drei kürzere Perioden einer rascheren Abkühlung um 1–2 °C unterbrochen, deren jeder eine Erholung der Temperatur folgte, wobei sich die letzte vor 2400 Jahren ereignete.

Herausragend unter den Temperaturfluktuationen der letzten 1000 Jahre sind die warme Periode des Mittelalters (1150–1350 n. Chr.), gefolgt von der sog. „Kleinen Eiszeit“ von 1500–1850 n. Chr. und danach (siehe Abb. 3, 4) von einem aufwärts gehenden Trend der globalen Temperaturen, der etwa 1880 beginnt und bis etwa 1940 anhält. Zwischen 1940 und 1970 gingen die Mitteltemperaturen um etwa 0,3 °C zurück, um den halben Wert bis zu dem Stand von 1880; aber dieser Abkühlungstrend, der im wesentlichen auf Breiten über 50 °N begrenzt war, ist während der letzten fünf Jahre zum Stehen gekommen, insbesondere im arktischen Becken (siehe Seite 8).

3. Analyse, Interpretation und Vorhersagewert klimatologischer Reihen

Für das Analysieren, Interpretieren, Extrapolieren und Schlüsse ziehen aus historischen Reihen ist es wichtig, sich zu vergegenwärtigen, daß die Größe klimatologischer Mittelwerte selbst nicht nur mit dem Standort, sondern mit der Periode und der Länge der Reihe variiert. Leider sind die Reihen oft zu spärlich und unvollständig, um Stetigkeit und logischen Zusammenhang in Raum und Zeit zu gewährleisten. Da Klimate nicht stationär sind, kann eine einzelne Periode, sagen wir von 50 Jahren, nicht repräsentativ sein oder eine gute Richtlinie dafür liefern, was in den nächsten 50 Jahren erwartet werden kann; tatsächlich war die Periode von 1931 bis 1960, auf deren statistische Werte sehr viele jüngste Untersuchungen bezogen wurden, wahrscheinlich eine der anomalsten 30jährigen Perioden in den letzten 1000 Jahren. Darüber hinaus verschweigen statistische Mittel oft mehr, als sie offenbaren, und eine angemessene Beschreibung des Klimazustandes sollte wenigstens die Veränderlichkeit und die Extremwerte enthalten und eine Korrelation zwischen zwei oder mehr Größen sollte von den Ergebnissen besonderer Signifikanztest begleitet sein.

Die Ergebnisse der Analyse einer Klimareihe, z. B. ein Energiespektrum (power spectrum) oder eine harmonische Analyse, können durch den Grad, bis zu dem die Daten durch Glätten, Filtern oder die Beseitigung langfristiger Trends vorbehandelt wurden, beeinflusst werden. Als Beispiel zeigt Abb. 5 ein Energiespektrum, das mit der Maximum-Entropie-Methode abgeleitet ist, von MANLEYs 250-Jahr-Reihe (1700–1950) der Jahresmit-

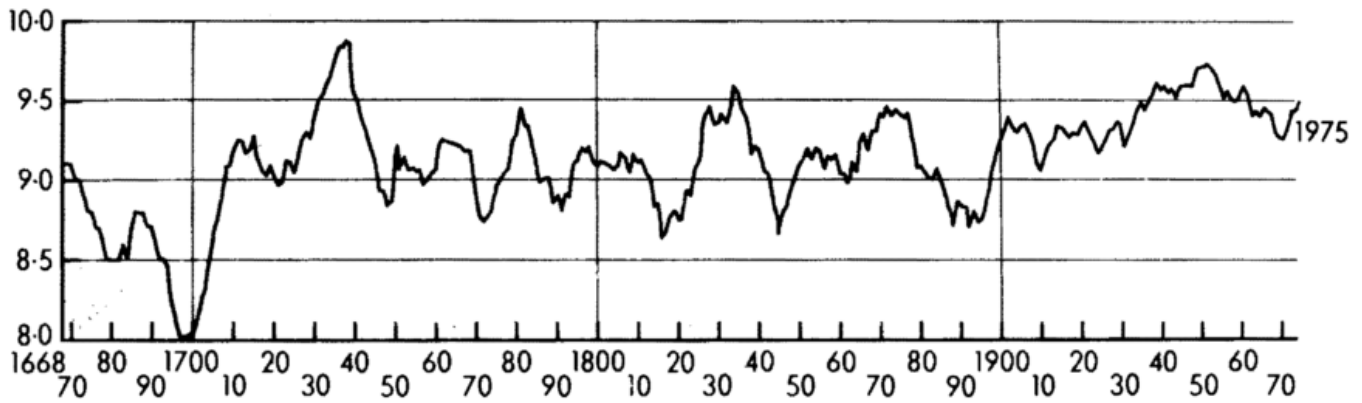


Abb. 3 Zehnjährige übergreifende Mittel der Temperaturen von Mittelengland von 1650 bis 1960, zusammengestellt von MANLEY und inzwischen bis 1975 ergänzt

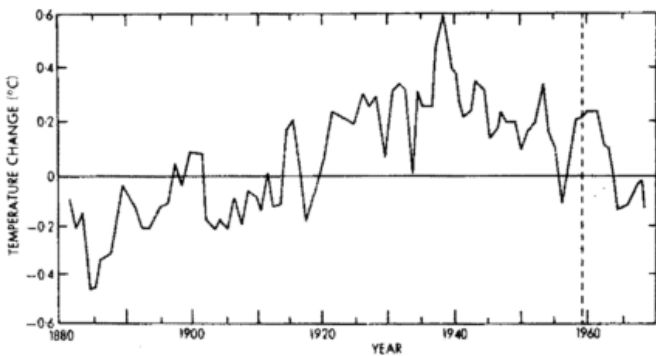


Abb. 4 Nachgewiesene Änderungen der mittleren Jahrestemperatur der Nordhalbkugel seit 1880 (nach BUDYKO 1969)

teltemperaturen von Mittelengland, aus denen der lineare langfristige Trend, der etwa 20% der Varianz ausmacht, entfernt worden ist. Je höher die Spitze für einen darunter angegebenen Bereich ist, umso größer ist ihre statistische Aussagekraft. Abb. 5 weist markante Spitzen bei 2,1, 5,2, 7,6, 14,5, 23 und 76 Jahren auf. Die ersten Spitzen, die mit der quasizweijährigen Schwingung (quasi-biennial oscillation = QBO) identifiziert werden kann, enthält etwa 10% der Gesamtvarianz und ist signifikant auf dem 5%-Niveau entsprechend SNEDECORs F-Test. Einige der Spitzen niedriger Frequenz sind wahrscheinlich das Ergebnis nichtlinearer Wechselwirkungen zwischen Periodizitäten höherer Frequenz, aber die 23-Jahr-Spitze, die etwa 8% der Varianz enthält und signifikant für das 0,1%-Niveau ist, könnte mit dem doppelten Sonnenfleckenzyklus zusammenhängen. Jedoch enthält die kleine 11,5-Jahre-Spitze weniger als 4% der Varianz und ist auf dem 10%-Niveau kaum signifikant.

Die harmonische Analyse der gleichen Reihe weist ebenfalls auf die QBO hin, in der die Sommer der ungeraden Jahre dazu neigen, wärmer zu sein als die der geraden, und auf einen markanten 23-jährigen Zyklus, aber wiederum ist ein 11,5-jähriger Zyklus kaum entdeckbar. Das markanteste Merkmal der Reihe ist der ansteigende Trend von etwa 1880 bis 1940. Die Jahresniederschläge für England und Wales zeigen, wenn sie harmonisch analysiert werden, eine schwache Spitze bei 2,4 Jahren und noch schwächere Spitzen bei 4, 5, 6 und ungefähr 50

Jahren. Die Sommerniederschläge zeigen keinen Trend in der 250-jährigen Reihe, aber die Winterniederschläge zeigen einen klaren Aufwärtstrend in Phase mit den steigenden Temperaturen von 1850 bis 1940.

Die Gefahren, die sich daraus ergeben, unkritische und leichtfertige Schlüsse aus anscheinenden Korrelationen zwischen dem Gang zweier Parameter über eine nur begrenzte Zeitspanne zu ziehen, sind in Abb. 6 dargestellt. KING (1973, 1974) veröffentlichte einige offensichtlich eindrucksvolle Beziehungen zwischen den Ernteerträgen verschiedener Feldfrüchte und dem Sonnenfleckenzyklus, indem er übergreifende 5-jährige Mittel über eine Periode von nur 25 Jahren benutzte. Analysen der Daten, die im Meteorological Office von FOLLAND vorgenommen wurden (nicht veröffentlicht), zeigen, daß alle Ernteserien in hohem Grade nichtlineare Trends entsprechend den verbesserten Produktionsmethoden haben, und wenn diese beseitigt werden, enthalten die quasi-11-Jahre-Spitzen in den Energiespektren nur einen kleinen Teil der Varianz aller Fälle. Darüber hinaus zeigt eine Analyse der Spitzen bei der Be-

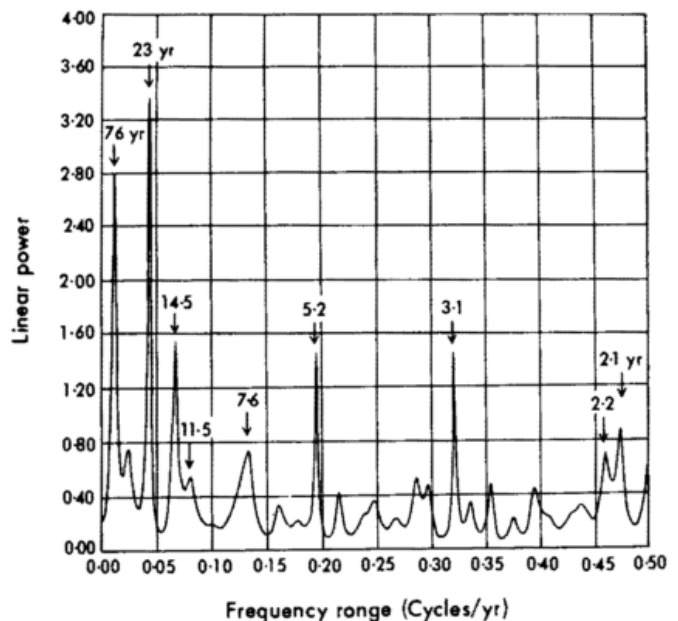


Abb. 5 Energiespektrum der MANLEY-Reihe der Temperaturen von Mittelengland unter Beseitigung des langfristigen Trends

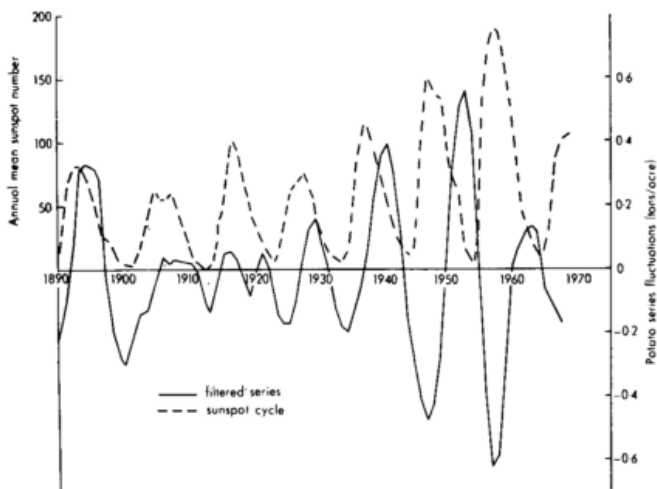


Abb. 6 Korrelationen für die Periode 1890-1970 zwischen dem Sonnenfleckenzyklus und der Folge von Kartoffelernten in Großbritannien, gefiltert für Zyklen von 1 bis 15 Jahren

nutzung quasi-orthogonaler Filter allgemein nur schwache Korrelationen der gefilterten Serien mit den Sonnenfleckenreihen und häufig damit in Beziehung stehende Wechsel von Amplitude und Phase zwischen den beiden. Das ist in Abb. 6 dargestellt, wo die von KING angeführte gegenläufige Beziehung zwischen dem Sonnenfleckenzyklus und den Kartoffelernten für die Periode 1935—1959 offensichtlich nicht über die längere Periode 1890—1935 durchhielt.

Sehr viele solcher Anstrengungen sind dem eifrigen Durchsuchen historischer Reihen nach Zyklen, regelmäßigen Strukturen oder Korrelationen gewidmet worden, die irgendeinen prognostischen Wert haben könnten. Um irgendwelchen Vorhersagewert zu haben, müssen die Reihen entweder enthalten:

- a) einen außer Frage stehenden Trend, dessen Ursache genügend verstanden wird, um zu zeigen, daß es unwahrscheinlich ist, daß er sich innerhalb der Vorhersageperiode ändert; oder
- b) eine wohldefinierte Periodizität, die sich über mehrere regelmäßige Zyklen erstreckt; oder
- c) Schwankungen, die nachweisbar durch einige bekannte periodenerzeugende Faktoren beherrscht werden.

Tatsächlich genügen nur sehr wenige Reihen diesen Bedingungen.

Die Analyse paläoklimatologischer Reihen der letzten Million Jahre, besonders das Energiespektrum der Isotopenzusammensetzung des fossilen Planktons in Tiefsee-Bohrkernen (die mit Schwankungen des Meeresspiegels und des gesamten globalen Eisvolumens verbunden ist), legt markante Spitzen mit Perioden von etwa 100 000, 40 000 und 20 000 Jahren frei — siehe Abb. 7. Diese haben mit säkularen Schwankungen im Umlauf der Erde um die Sonne in Verbindung gestanden, nämlich Änderungen der Exzentrizität der Erdumlaufbahn (Periode 96 600 Jahre), der Schiefe ihrer Achse (40 000 Jahre) und dem Vorrücken (Präzession) der Länge des Periheliums (21 000 Jahre), was zuerst von MILANKOVITCH vermutet wurde (1930). Es gibt noch

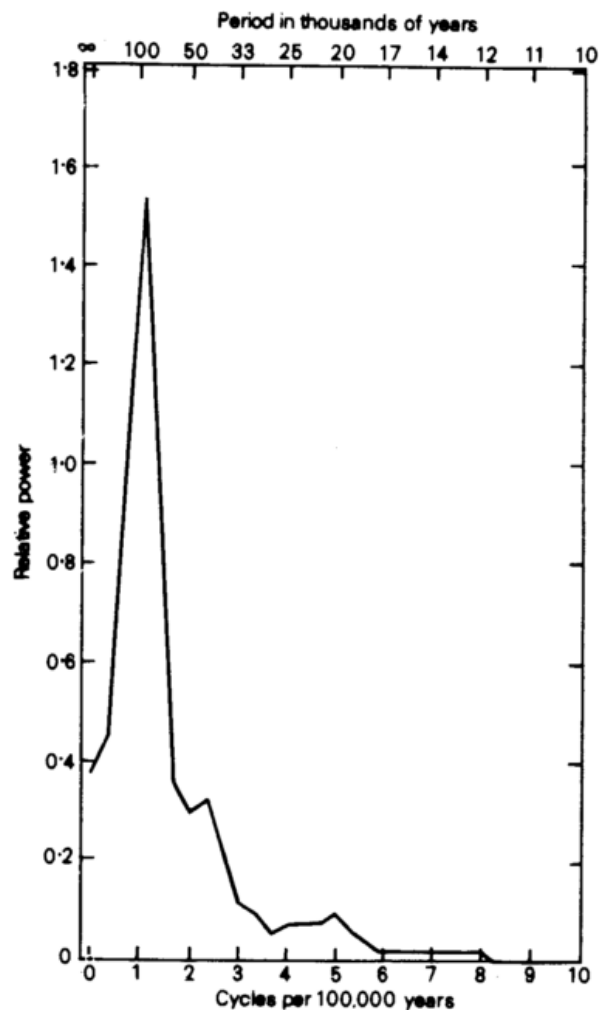


Abb. 7 Energiespektrum einer zeitlichen Folge von Beobachtungen des Gehalts an Sauerstoffisotopen von fossilem Plankton in einem Tiefseebohrkern aus dem äquatorialen Pazifik, das Fluktuationen des globalen Eisvolumens während der vergangenen 600 000 Jahre anzeigt (aus dem US National Academy Report „Understanding Climatic Change“, 1975, S. 144)

zwei viel kleinere und schwach definierte Spitzen bei etwa 2500 und 100—400 Jahren, die oberhalb des „Zufallsrausens“ (random noise) signifikant zu sein scheinen, aber weder eine bekannte Ursache haben noch zu irgendwelchen von außen wirkenden Faktoren in Beziehung stehen, die auf das Klima einen beherrschenden Einfluß ausüben könnten. Die Isotopenzusammensetzung eines Bohrkerens aus dem Grönlandeis, gewonnen von DANSGAARD u. a. (1971), die benutzt wurde, um eine Temperaturreihe der letzten 10 000 Jahre aufzustellen, zeigt Spitzen in den letzten 1000 Jahren in Abständen von 77 und 177 Jahren. Obwohl jedoch diese Reihe genau angeordnet worden ist, um sie mit einigen der längerperiodischen Klimaschwankungen zu vergleichen, die aus den Tiefseesedimenten abgeleitet wurden, zeigt sie ziemlich geringe Übereinstimmung mit MANLEYs 250jähriger Reihe aktueller Temperaturen von Mittelengland (siehe Abb. 8), und dies wirft einige Zweifel auf die Zuverlässigkeit der Bohrkern-datierung, wenn sie auf die ziemlich kleinen Schwankungen der letzten paar hundert Jahre angewandt wird.

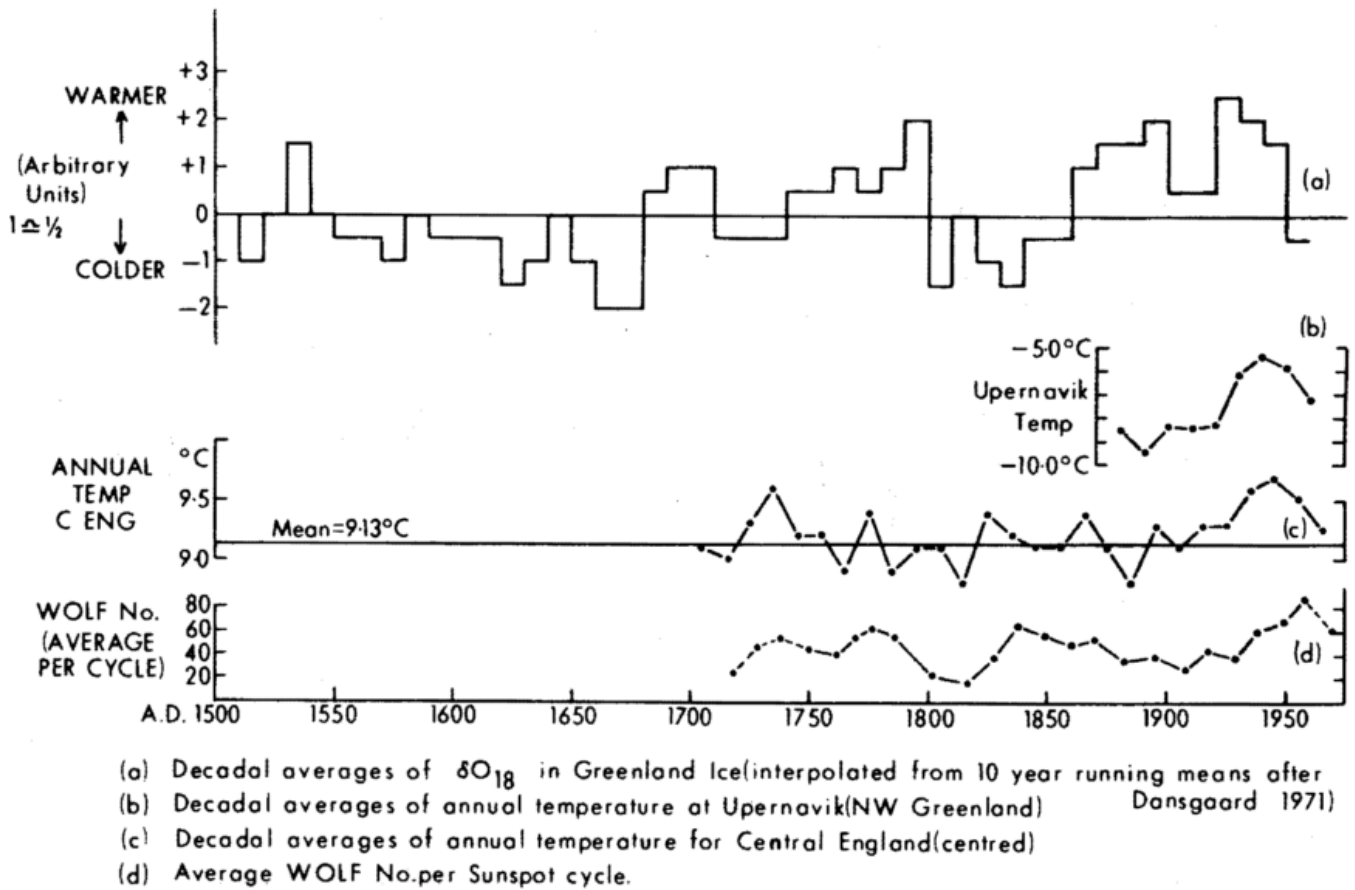


Abb. 8 Historische Temperaturreihen, wie in der Legende beschrieben

Abgesehen von den sehr langfristigen „astronomisch verursachten“ Änderungen nach MILANKOVITCH, werden die Reihen so sehr von unregelmäßigen Fluktuationen beherrscht mit — wenn überhaupt — nur wenigen regelmäßigen Zyklen oder außer Frage stehenden Trends, daß sie für die Vorhersage zukünftiger Ereignisse von geringem Wert sind. Die sich nicht lohnende Suche nach sich wiederholenden Mustern oder Zyklen ist in einem kürzlichen Bericht der US National Academy of Sciences (1975) in zutreffenden Worten wie folgt zusammengefaßt worden:

„Seit der Entwicklung moderner Verfahren der Analyse von zeitlichen Reihen, insbesondere solcher, die die Bestimmung des Varianz- oder Energie-) Spektrums einschließen, ist klar geworden, daß fast alle angeblichen klimatischen Zyklen entweder

- (1) künstliche Produkte der statistischen Auswahlverfahren,
- (2) aus so kleinen Bruchstücken der gesamten Varianz bestehen, daß sie im Grunde genommen für Vorhersagezwecke nutzlos, oder
- (3) eine Kombination von beiden sind.“

Nichtsdestoweniger können die Reihen benutzt werden, um innerhalb weiter Grenzen die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, ob Fluktuationen einer gegebenen Größe und Dauer innerhalb eines einzelnen angegebenen Zeitabschnitts auftreten, und zu beurteilen, ob ein besonderes Ereignis in dem Sinne „anormal“ ist, daß es erheblich außerhalb der Erwartung liegt, die sich auf die

Varianz einer langjährigen Reihe gründet.

So gesehen dürfen wir darauf hinweisen, daß kürzliche Katastrophen wie die Dürren im Sahel-Gebiet Afrikas, die keineswegs beispiellos sind, in der Vergangenheit ihre Parallelen haben — wie es aus den Abb. 9 und 10



Abb. 9 Fünfjährige Mittel des jährlichen Niederschlags in der Sahel-Region von Westafrika, ausgedrückt in Prozenten des Mittels von 1905-1970. Die gestrichelte Kurve zeigt den langfristigen Trend

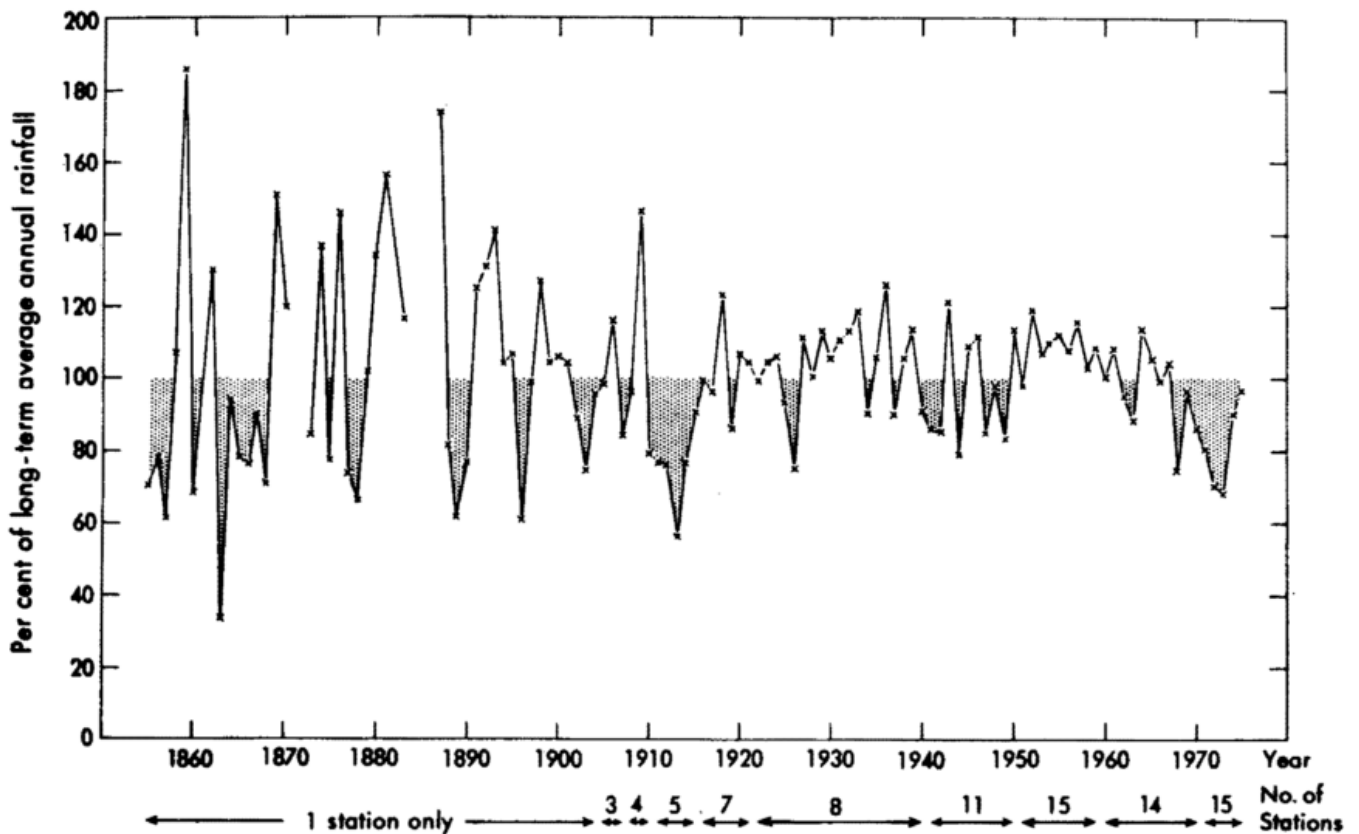


Abb. 10 Jährlicher Niederschlag in der Sahel-Region von Afrika, der in Prozenten des langjährigen Mittels ausgedrückt ist und unregelmäßige Gruppen nasser und trockener Jahre zeigt

hervorgeht. Obwohl nasse und trockene Perioden dazu neigen, in unregelmäßigen Bündelungen von Jahren aufzutreten, kommen sie nicht in regelmäßig vorhersagbaren Abständen vor. Die kürzlichen Dürren sind einer Änderung der globalen atmosphärischen Zirkulation zugeschrieben worden, die zu einer Südwärtsverlagerung der Hauptklimazonen einschließlich der Wüste Sahara führte, aber eine kürzliche sorgfältige Analyse im Meteorological Office von PAINTING zeigt, daß die Situation nicht so einfach ist und daß sich der subtropische Hochdruckgürtel während der letzten fünf Jahre tatsächlich leicht nordwärts verlagert hat.

Es gibt, so glaube ich, keinen realen Beleg, der anzeigt, daß die globale Struktur des Klimas eine rasche und anhaltende Änderung erfährt oder daß kürzliche Ereignisse in dem Sinne anormal sind, daß sie außerhalb der Erwartung liegen, die sich auf die Varianz der historischen Reihe gründet. Eine realistischere, wenn auch weniger dramatische Annahme würde darin bestehen, daß jene Fluktuationen des Klimas sich mit etwa der gleichen Größe, Frequenz und Variabilität wie in den vergangenen Jahrhunderten ereignen werden, denen langfristige Trends überlagert sind, deren Beginn und Umkehrung noch nicht vorhergesagt werden kann. Zur Zeit befinden wir uns in einer warmen interglazialen Periode, deren Dauer in der Vergangenheit im Mittel 50 000 Jahre betrug. Es ist wahrscheinlich, daß die gegenwärtig sehr warme Zwischenzeit, die schon seit 10 000 Jahren anhält, schließlich den Weg für die Periode eines kälteren Klimas freigibt. Vom Standpunkt der Statistik kann

die Chance, daß solch ein Übergang in den nächsten hundert Jahren beginnen wird, mit 1 zu 100 angesetzt werden, aber das Absinken um etwa 10°C würde sich wahrscheinlich über mehrere tausend Jahre erstrecken. Größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine Abkühlung eintreten könnte, aber sich nicht zu den vollen Eiszeitbedingungen durchsetzen würde. Die Aussichten einer anhaltenden Kältewelle, weit entfernt von Eiszeitbedingungen, innerhalb des nächsten Jahrhunderts mit etwa um 1°C niedrigeren Mitteltemperaturen, so wie sie zwischen 1500 und 1850 auftrat, müssen mit etwa 1 zu 5 ziemlich hoch veranschlagt werden. Jedoch gibt es keine physikalische Grundlage, um solche Änderungen nach Zeit und Größe vorherzusagen, da wir die zugrundeliegenden Ursachen noch nicht verstehen. Desgleichen gibt es keine reale Grundlage für die alarmierenden Vorhersagen eines bevorstehenden Eiszeitalters, die größtenteils auf der Extrapolation des 30jährigen Trends fallender Temperaturen auf der Nordhalbkugel zwischen 1940 und 1965 beruhen (siehe Abb. 4). Abgesehen von den erheblichen Zweifeln, Vorhersagen aus solch einer stark fluktuierenden Reihe durch Extrapolation eines so kurzperiodischen Trends abzuleiten, gibt es jetzt Belege dafür, daß letzterer zum Stillstand gekommen ist. Eine kürzliche Untersuchung im Meteorological Office durch PAINTING (1976) zeigt, daß seit 1970 ein Anstieg der Temperaturen um etwa $0,2^{\circ}\text{C}$ sowohl an der Erdoberfläche wie auch zwischen 1000 und 500 mb im Arktischen Becken, ein markanter Rückgang sowohl der Schneedecke über Land (ausgenommen ein Gebiet nörd-

lich des Himalaya) als auch des Meereises und eine Verstärkung der westlichen Winde mit weniger häufigen Kaltluftausbrüchen aus dem Norden stattgefunden haben, die zu einer Folge milder Winter in Europa führten. In den mittleren Breiten hat sich der Abkühlungstrend fortgesetzt, aber in geringerem Ausmaße.

4. Einige mögliche Ursachen für Klimaänderungen

a) Änderungen der Sonnenausstrahlung

Auf der Suche nach möglichen Ursachen für größere klimatische Fluktuationen könnte man Änderungen in den von außen kommenden Kräften und Wirkungen, die auf die Atmosphäre Einfluß nehmen, interne Änderungen innerhalb des Systems Atmosphäre — Ozean selbst oder, was wahrscheinlicher ist, eine wechselwirkende Kombination von beiden ins Auge fassen.

Da die Sonne die ganz überwiegende Energiequelle zum Inganghalten der atmosphärischen Zirkulation darstellt, ist es naheliegend, entweder mögliche Schwankungen in der Sonnenausstrahlung oder wenigstens säkulare Schwankungen der Intensität der Sonnenstrahlung, die die Erde erreicht, als den möglichen Mechanismus für die periodische Klimabeeinflussung zu betrachten. Jedoch hat sich die Suche nach den notwendigen Beweisen und nach dem Verständnis für solche Beziehungen zwischen Sonne und Wetter als sehr schwierig und weitgehend unbelohnt erwiesen.

Große Anstrengungen sind der Überwachung der Intensität der Gesamtsonnenstrahlung (der sog. „Solarkonstanten“) und der Untersuchung der Daten zum Nachweis zyklischer oder periodischer Änderungen gewidmet worden. Da die meisten der Messungen an der Oberfläche der Erde oder innerhalb der Atmosphäre gemacht worden sind, hat es sich als schwierig erwiesen, festzulegen, ob kleine Schwankungen der gemessenen Größen durch Änderungen der Sonneneinstrahlung oder durch Fluktuationen der atmosphärischen Absorption verursacht sind. Obwohl diese Probleme im Prinzip durch Messungen von Satelliten aus überwunden werden können, sind im Weltraum eingesetzte Strahlungsmesser nicht fähig, Schwankungen von der Größenordnung 0,1% anzuzeigen. Zur Zeit gibt es keinen überzeugenden Beweis dafür, daß der gesamte jährliche Energiefluß von der Sonne, der an der oberen Grenze der Atmosphäre einfällt, um mehr als 1% variiert, selbst während solarer Störungen. Während des Auftretens von Sonneneruptionen und anderen Perioden vermehrter Sonnenaktivität tritt eine markante Zunahme der Ausstrahlung von ultravioletter und Korpuskularstrahlung auf, aber sie tragen nur etwa 0,1% zum gesamten Strahlungsfluß bei.

Eine einfache Berechnung der Strahlungsbilanz ergibt, daß eine Änderung der Solarkonstanten um 1% die mittlere Gleichgewichtstemperatur der Erdoberfläche bei einer Albedo von 0,3 zu einer Änderung um 0,6 °C veranlassen würde. Eine mehr in die Einzelheiten gehende Berechnung von WETHERALD und MANABE (1975),

die auf einem vereinfachten dynamischen Modell der globalen Zirkulation mit einem bestimmten Bedeckungsgrad beruht, und in dem der Ozean wegen der Verdunstung wie eine nasse Oberfläche behandelt wird, aber keine Wärmekapazität hat und keine Wärme transportiert, weist nach, daß eine Zunahme der Solarkonstanten um 2% ein Ansteigen der mittleren Oberflächentemperatur der Erde um 3 °C erzeugen würde, aber daß eine Abnahme um 2% ein Sinken der Mitteltemperatur um 4,3 °C zur Folge haben würde. Die aus den Rechnungen abgeleiteten Änderungen sind in der Nähe der Pole viel größer als am Äquator als Folge der markanten Änderungen der Schneebedeckungen und der Albedo. Die auffallendste Wirkung betraf den Niederschlag, wo eine 6%ige Änderung (von -4% bis +2%) der Solarkonstanten eine 27%ige Zunahme der Werte des Flächenmittels des Niederschlags erzeugte. Es gab eine unverhältnismäßig größere Abnahme der Schneefallrate, weil der Rückgang der Zone mit Bodentemperaturen unter Null Grad in Richtung Pol die Zone des maximalen Schneefalls von der stark baroklinen Zone hoher Gesamtniederschläge in den mittleren Breiten verschob. Wegen der Beschränkungen und Vereinfachungen des Modells können die numerischen Größen der berechneten Änderungen nur innerhalb eines Faktors zwei als zuverlässig angesehen werden. Dieses besondere Modell, das es erlaubt, die Oberflächentemperaturen des Ozeans in Übereinstimmung mit der örtlichen Strahlungsbilanz zu ändern, das keine Wärmespeicherung oder Wärmetransport in den Ozeanen kennt und eine bestimmte Wolkenbedeckung hat, übertreibt sicherlich die Änderungen der mittleren Oberflächentemperatur und des Niederschlags. Wenn dem so ist, gilt als Folgerung, daß eine 1%ige Änderung der Solarkonstanten die Bodentemperatur nur um 1 bis 2 °C und den Niederschlag um < 5% ändert. Da, wie wir gesehen haben, die Schwankungen der Solarkonstanten in den vergangenen Jahrhunderten wahrscheinlich beträchtlich unter 1% gewesen sind, ist es nicht überraschend, daß selbst die hoch auflösenden instrumentellen und Baumring-Registrierungen darin versagen, markante periodische Fluktuationen in Verbindung mit den Sonnenflecken nachzuweisen. Wenn auch emsiges Überprüfen der gewaltigen Masse an verfügbaren Daten, die von tausenden von Stationen ausgewählt wurden, auffallende Korrelationen zwischen meteorologischen Parametern und dem Sonnenfleckenzyklus (oder gar weniger einleuchtenden verwandten Ereignissen) für ein kleines Gebiet oder einem begrenzten Zeitabschnitt zum Vorschein bringen mögen, so erweisen sich doch nur wenige solcher Korrelationen als ausreichend sowohl über dem Raum als auch über der Zeit und als beständig ohne Änderungen in der Größe und Phase: es gibt wenig Grund zu folgern, daß die Phänomene kausal verknüpft sind.

Die Natur des Problems möge durch die Tatsache veranschaulicht werden, daß eine jüngste Computeranalyse der nordhemisphärischen Daten des Bodendruckes, die vom Meteorological Office vorgenommen wurde, die Existenz einer markanten 22jährigen Periode (doppelter

Sonnenflächenzyklus), auf die MAKSIMOV und SLEPCOV-SEVLEVIC (1971) hinweisen, nicht bestätigen konnte, und die zeigte, daß irgend eine geringe Schwankung, die innerhalb eines 11jährigen Zyklus vorhanden sein mochte, nicht leicht von den größeren Schwankungen von Jahr zu Jahr, die auf andere Ursachen zurückgehen, getrennt werden konnte. Die Analyse der Reihe der mittleren Jahrestemperaturen für Mittelengland von 1750—1974 zeigte, daß, während die „ungeraden“ Epochen des HALEschen 22jährigen (doppelten) Sonnenflecken-Zyklus zwischen der Mitte des 18. und der Mitte des 20. Jahrhunderts um ein paar Zehntel C-Grade wärmer waren als die „geraden“ Epochen, vor dieser Zeit und seitdem eine Änderung in der Phase in dem Sinne stattgefunden zu haben scheint, daß die „ungerade“ Hälfte des HALE-Zyklus zu der kälteren der beiden würde. Andererseits können Entdeckungen, wie jene von JENKINSON (unveröffentlicht), daß die Daten des Winter- (aber nicht des Sommer-) Niederschlags für das Vereinigte Königreich seit 1873 eine Spitze von $7\frac{1}{2}\%$ über dem Mittel gerade vor dem Sonnenflecken-Maximum und einen $7\frac{1}{2}\%$ igen Fehlbetrag gerade vor dem Minimum zeigen, nicht vollständig abgelehnt werden und stützen das Interesse an dem Gegenstand, selbst wenn es keine überzeugende Erklärung dafür gibt.

Auch das Vorhandensein von längeren Periodizitäten von 80—90 und 180—200 Jahren in den Klimareihen ist behauptet worden, insbesondere für die Lufttemperatur. Das Vorhandensein einer signifikanten Spitze bei 76 Jahren in MANLEYs Reihe der Temperaturen von Mittelengland (Abb. 5) und von Spitzen bei 77 und 177 Jahren in der Sauerstoffisotopenreihe des Grönland-Eiskerns sind schon erwähnt worden. Es hat eine Strömung gegeben, diese Periodizitäten mit ähnlichen Schwankungen der Sonnenaktivität in Verbindung zu bringen, aber das Energiespektrum der mittleren jährlichen Sonnenfleckenanzahlen hat eine Spitze bei 90 Jahren und der jüngste Abschnitt der Meßreihe aus dem Grönland-Eiskern korreliert nur schwach mit gemessenen Temperaturen und mit der Reihe der Sonnenfleckenanzahlen. Man ist daher geneigt, mit MILES (1974) darin übereinzustimmen, daß „der Beweis für periodische Schwankungen der Sonnenaktivität über 80—90 und 180—200 Jahre nicht stark genug zu sein scheint, um den schwachen Nachweis für Zyklen dieser Länge in der Lufttemperatur oder in den Zirkulationsstrukturen zu unterstützen und den Schluß zu erlauben, daß letztere durch periodische Schwankungen der Solarkonstanten reguliert werden“.

b) *Langfristige Änderungen der solaren Einstrahlung*
Auf viel längeren Zeitskalen variiert die Intensität der in die Atmosphäre einfallenden Sonnenstrahlung infolge der säkularen Änderungen in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, nämlich Änderungen der Exzentrizität ihrer Umlaufbahn mit einer Periodizität von 96 000 Jahren, Änderungen ihrer Achsenneigung (40 000 Jahre) und Änderungen entsprechend dem Vorrücken (Präzession) der Länge der Sonnennähe (Perihelium), gleichbedeutend mit der Präzession der Sonnenwenden (Solsti-

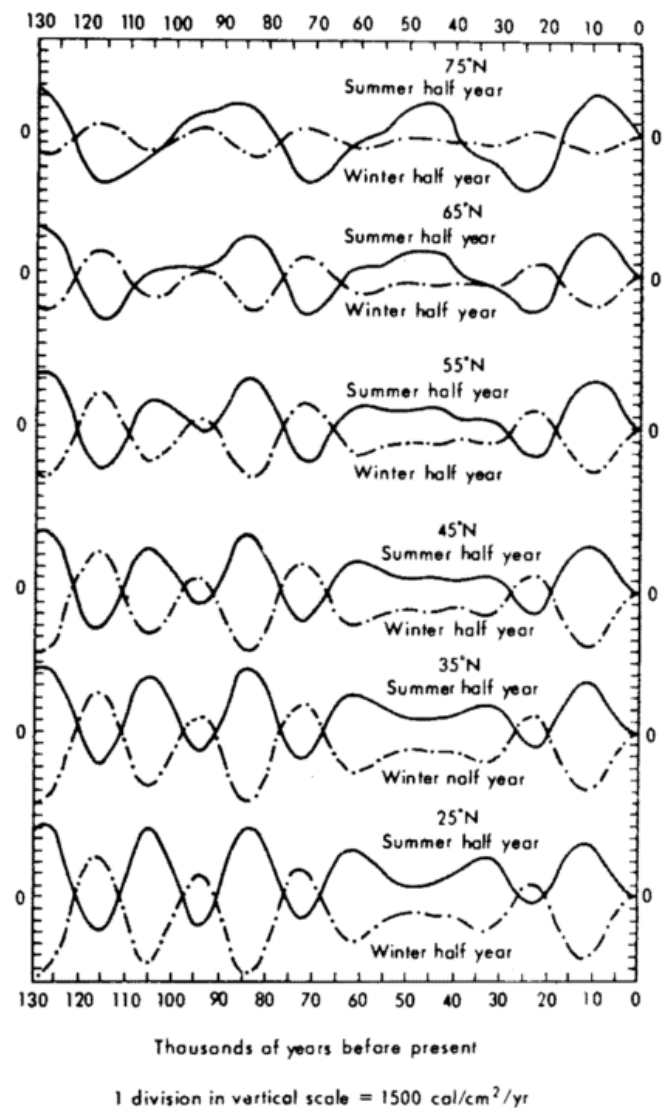


Abb. 11 Die Schwankungen des Strahlungsflusses während der letzten 130 000 Jahre für die Breiten zwischen 25° und 75° N in den Sommer- und Winterhalbjahren nach MILANKOVITCH (1930)

tien) und Tag- und Nachtgleichen (Äquinoktien) (21 000 Jahre). Die sich daraus ergebenden Schwankungen der einfallenden Sonnenstrahlung wurden von MILANKOVITCH (1930, 1938) als eine Funktion von Jahreszeit und Breite für die letzte Million Jahre berechnet. Die Schwankungen über die letzten 130 000 Jahre auf der Nordhalbkugel sind in Abb. 11 dargestellt. In hohen Breiten werden sie von dem 40 000 Jahr-Zyklus beherrscht, in dem die Neigung der Erdoberfläche zuletzt einen Maximalwert erreichte und ein Maximum der Einstrahlung in den hohen Breiten vor 10 000 Jahren hervorrief. Dies stimmte mit der raschen Beendigung der letzten Eiszeit überein, wie sie durch Abschmelzen der Eisdäcker und einen raschen Anstieg des Meeresspiegels angezeigt wurde. In niedrigen Breiten dominiert der 20 000-Jahrzyklus.

Die Fluktuationen in Abb. 11 sind viel größer als irgendwelche säkulare Fluktuationen, die je bei der „Solarkonstanten“ beobachtet wurden, und reichen von etwa

+1% vor 10 000 Jahren bis -2% vor 25 000 Jahren bei der jährlichen einfallenden Sonnenstrahlung in 65° Breite. Die Sommer- und Winterkomponenten zeigen größere Fluktuationen, die dazu neigen, sich im Jahresmittel aufzuheben. Zum Beispiel war vor 10 000 Jahren die Strahlung, die im Sommerhalbjahr empfangen wurde, in allen Breiten um 4% größer als in der Gegenwart und MILANKOVITCH vermutete, daß die Bodentemperatur in 65°N die derzeitigen Werte um 4°C überstieg und um fast 5°C in 25°N, während die Änderung der jährlichen Mitteltemperatur in 65°N nur 0,7°C betrug. Selbst diese letztere Zahl ist als zu hoch bestritten worden, zum Beispiel durch SAWYER (1966), der zu einem Wert von 1/6°C kam. Es ist daher von Interesse, die von MILANKOVITCH abgeschätzten Temperaturänderungen mit denen zu vergleichen, die mit Hilfe numerischer Modelle vorhergesagt wurden.

SHAW und DONN (1968) berechneten, indem sie ADAMs einfaches Modell des Energiegleichgewichts benutzten, in enger Übereinstimmung mit MILANKOVITCH, daß, als der Strahlungsfehlbetrag vor 25 000 Jahren ein Maximum (2%) hatte, die jährliche Mitteltemperatur in 65°N um 1,4°C niedriger als heute gewesen wäre. WETHERALD und MANABE (1975) berechneten, indem sie das oben beschriebene vereinfachte globale Zirkulationsmodell (GCM) benutzten, daß eine 2%ige Erniedrigung der „Solarkonstanten“ die jährlichen Bodentemperaturen in 65°N um 5°C und die globalen Mitteltemperaturen um 4,3°C erniedrigen würde. Eine 4%ige Erniedrigung der Solarkonstanten soll nach dieser Berechnung eine Abnahme der globalen Mitteltemperaturen um 10°C verursachen, ohne jedoch eine instabile Eiskappe zu schaffen, die sich auf dem ganzen Weg bis zum Äquator ausbreitet. Wie wir auf Seite 9 erörtert haben, überschätzen diese besonderen Modellergebnisse wahrscheinlich die Temperaturänderungen, aber immerhin legen sie nahe, daß MILANKOVITCHs Annahmen der Temperaturfluktuationen, die durch Änderungen in der Erdumlaufbahn herbeigeführt wurden, nicht in hohem Maße übertrieben sind. Da überdies die sommerliche Strahlung von größerer Bedeutung ist als die jährlichen Mittelwerte bei der Bestimmung der Ablagerung von Eis und Schnee von Jahr zu Jahr, besonders um 65°N herum, wo die Erde von Gebirgen mit hohem Winterschneefall umringt ist, scheint es außerdem, daß die MILANKOVITCH-Schwankungen bei der Einstrahlung, die Temperaturveränderungen von 4 bis 5°C erzeugen, sehr wohl für das Einleiten der Vorstöße und Rückzüge der Eisbedeckungen verantwortlich sein könnten.

5. Eine Erweiterung der MILANKOVITCH-Theorie der Eiszeiten

Abb. 2 zeigt, wie sich das Meeresniveau und dementsprechend das Volumen der kontinentalen Eisdecken während der letzten 150 000 Jahre geändert haben, zusammen mit entsprechenden Änderungen der mittleren

globalen Bodentemperatur. Dieses Diagramm weist darauf hin, daß das Eis nach dem Klimaoptimum vor 120 000 Jahren einen begrenzten ersten Vorstoß über einen Zeitabschnitt von 10 000 Jahren machte und um diesen Wert für weitere 30 000 Jahre fluktuierte, bevor es einen größeren Vorstoß machte, und ungefähr die Hälfte seiner äußersten Ausdehnung innerhalb von etwa 8000 Jahren erreichte. Dann fuhr es nach einem begrenzten Rückzug, der etwa 30 000 Jahre dauerte, fort, sich auszudehnen und erreichte seine größte Bedeckung vor 20 000 Jahren. Während der gesamten Eiszeit stieß die südliche Grenze der Eis- und Schneegrenze im Mittel von 50°N bis 40°N vor.

Im gleichen Diagramm habe ich die Schwankungen der jährlichen Einstrahlung eingetragen, wie sie nördlich von 45°N empfangen wird, entsprechend den Änderungen in der Erdumlaufbahn unter Benutzung von MILANKOVITCHs ursprünglichen Rechnungen und der überarbeiteten Zahlen von VERNEKAR (1972). Die Amplitude dieser Schwankungen ist etwa $4 \cdot 10^{18}$ cal/Tag oder $1,5 \cdot 10^{21}$ cal/Jahr, ungefähr 1% des gesamten Strahlungseinfalls auf dieses Gebiet. Das bedeutendste Merkmal von Abb. 2 ist die enge Korrelation zwischen den Hauptvorstößen und -rückzügen des Eises und dem 40 000 Jahr-Zyklus der Schwankungen der Sonneneinstrahlung, wobei die Maxima der Eisbedeckung fast mit den Minima der Strahlung oberhalb 45°N übereinstimmen.

Unter Verwendung von MILANKOVITCHs Originaldaten habe ich ausgerechnet, daß es zwischen 83 000 und 18 000 Jahren vor der Gegenwart, als sich das Eis zurückziehen begann, einen Gesamtfehlbetrag von $4,5 \cdot 10^{25}$ cal oder 1000 cal für jedes Gramm geformten Eises gab. VERNEKAR's überarbeitete Daten geben einen kleineren Fehlbetrag von $2,5 \cdot 10^{25}$ cal, der jedoch fast ausreicht, um die 677 cal/g zu kompensieren, die in der Atmosphäre bei der Schneebildung frei werden. Während der vergangenen 18 000 Jahre betrug nördlich von 45°N der gesamte Überschuß an Einstrahlung 10^{25} cal (MILANKOVITCH) oder $1,4 \cdot 10^{25}$ cal (VERNEKAR). Der Überschuß zwischen 16 000 und 6000 Jahren vor der Gegenwart, als etwa 90% des Eisens, d. h. $40 \cdot 10^8$ km³ verschwanden, war $4,2 \cdot 10^{24}$ cal (M) oder $1,0 \cdot 10^{25}$ cal (V), verglichen mit den $3,2 \cdot 10^{24}$ cal, die benötigt wurden, um die latente Wärme für das Schmelzen zu liefern. Wenn jedoch das anfängliche Schmelzen des Eises tatsächlich so rasch vor sich ging, wie Abb. 2 es zu verstehen gibt, würde es schwierig sein, dies in Werten der zu dieser Zeit verfügbaren Strahlung zu erklären, aber anfangs mag bei dem Abschmelzen die Freisetzung von Ozeanwärme, die während der vorausgehenden glazialen Epoche gespeichert worden war, geholfen haben, wie auch der gesteigerte meridionale Transport in der Atmosphäre, wie er von NEWELL (1974) angegeben wurde. Es ist auch möglich, daß die Fluktuationen der Strahlung im Sommer (vor 10 000 Jahren betrug der Überschuß nördlich von 45°N 10^{19} cal/Tag) einen entsprechend größeren, verstärkenden Effekt auf den Vorstoß und den Rückzug des Eises hatten, als auf die jährlichen Schwankungen. Jedoch können Bildung und Ab-

schmelzen des Eises wegen der Verluste und Neuverteilung, denen die Sonnenstrahlung nach dem Eintritt in die Atmosphäre unterliegt, und wegen aller Rückkopplungsprozesse kaum allein unter Berücksichtigung der langfristigen Fluktuationen der an der Grenze der Atmosphäre einfallenden Strahlung erklärt werden. Dies wird eine Aufgabe für realistische numerische Modelle des Systems Atmosphäre-Ozean-feste Erde sein, in die Jahreszeiteffekte, wechselnde Bewölkung und Albedo, ein gesamtes wechselwirkendes Strahlungsschema und Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und dem Ozean einbezogen sind, und die auch Berechnungen von Wärme- und Salztransporten durch Meeresströmungen einschließen.

Die Bedeutung meridionaler Wärmetransporte durch die Ozeane für den Vorstoß und den Rückzug der globalen Eisbedeckung wird in einer interessanten neuen Arbeit von NEWELL (1974) hervorgehoben. Er schlägt die Existenz von zwei quasistabilen Formen der atmosphärischen Temperatur- und Zirkulationsverhältnisse entsprechend den sich abwechselnden Eiszeiten und Zwischeneiszeiten vor und meint, daß diese durch zwei Arten der Aufteilung des polwärts gerichteten Energieflusses zwischen Atmosphäre und Ozean gekennzeichnet sind. In der derzeit herrschenden warmen Zwischeneiszeit beträgt der ozeanische Transport über 30 °N hinweg etwa $3,3 \cdot 10^{19}$ cal/Tag und jener der Atmosphäre etwa $5,1 \cdot 10^{19}$ cal/Tag. NEWELL weist darauf hin, daß die Ozeane in einer kalten Epoche weniger und die Atmosphäre mehr Wärme als heute transportieren, wobei der gesamte polwärts gerichtete Transport etwas geringer ist. Während des Vorrückens der Vergletscherung erwärmen sich die Ozeane langsam und verursachen schließlich die Beendigung der Eiszeit; umgekehrt kühlen sich die Ozeane während des interglazialen Regimes langsam ab, wobei sie den Rückzug des Eises zum Stehen bringen, was zur nächsten Vereisung führt.

Den Mechanismus stellt man sich wie folgt vor: Da das Eis zurückweicht, setzt es ein zunehmendes Gebiet von ozeanischem Oberflächenwasser der Abkühlung durch Strahlung aus. Dieses kalte Wasser, das bei 4 °C eine maximale Dichte hat, sinkt unter und fließt als ein langsamer kalter Unterstrom äquatorwärts. Da es stabil geschichtet ist, verhindert es sowohl die Übertragung der Wärme von dem Ozeanboden nach oben als auch die Übertragung abwärts von den darüber liegenden Oberflächenschichten. Das unter der Oberfläche liegende Wasser kühlt sich deswegen allmählich ab, und wenn es an die Oberfläche gebracht wird, z. B. beim Aufquellen vor der Küste bei starken ablandigen Winden, wird der polwärts gerichtete Wärmetransport als Folge winderzeugter ozeanischer Oberflächenströme und Zirkulationen vermindert. Dies führt zu weiteren Abkühlungen in hohen Breiten und bewirkt, daß das Abschmelzen und der Rückzug des Eises angehalten und schließlich umgekehrt werden. Andererseits schirmt das Eis, wenn es vorstößt, das darunter liegende Wasser vor starker Strahlungsabkühlung ab und schwächt die Quelle des kalten ozeanischen Unterstroms, so daß sich die Ozeane

allmählich aufwärmen und ihren Beitrag zu dem polwärts gerichteten Wärmefluß vergrößern, der weiterhin durch den stärkeren meridionalen Temperaturgradienten infolge der Ausdehnung des Eises erhöht wird. Dies wiederum sorgt für einen negativen Rückkopplungsmechanismus, so daß die Ausbreitung des Eises gehemmt wird, aber das geht wahrscheinlich nur langsam vor sich, so daß die Oberfläche des Ozeans und die darüber liegende Atmosphäre kalt bleiben und ausgedehnte Eisdecken aufrechterhalten, bis die Sonneneinstrahlung zunimmt.

NEWELL nimmt den Wechsel im polwärts gerichteten Energiefluß, der notwendig ist, um einen Übergang von einer warmen zu einer glazialen Epoche zu verursachen, wie folgt an: Die Differenz zwischen den Volumen des Landeises, das auf der Nordhalbkugel vor 20 000 Jahren und heute existiert, ist gleichbedeutend mit etwa $47 \cdot 10^6$ km³ Wasser. Seine Bildung durch Ablagerung von Wasserdampf würde 677 cal/g oder insgesamt $3,2 \cdot 10^{25}$ cal in der polaren Atmosphäre freisetzen. NEWELL nimmt an, daß dies alles praktisch durch Ausstrahlung in den Weltraum während einer Periode rascher Vereisung verloren ging, die ungefähr 8000 Jahre dauerte und nicht durch einen polwärts gerichteten Transport in der Atmosphäre und den Ozeanen kompensiert wurde, wobei der Fehlbetrag 10^{19} cal/Tag betrug, d. h. etwa ein Drittel des heutigen ozeanischen Transports über 30 °N hinweg. Wir können nebenbei bemerken, daß, da nur etwa die Hälfte des gesamten Eisvolumens, das NEWELL erwähnt, in 8000 Jahren gebildet wurde (siehe Abb. 2), eine genauere Abschätzung des Fehlbetrags in enger Übereinstimmung mit dem maximalen Fehlbetrag an Sonnenstrahlung auf 5×10^{18} cal/Tag kommen würde, wie er in Abb. 2 eingetragen ist.

NEWELLs Mechanismus ist ein interessantes Beispiel eines möglichen internen Rückkopplungsprozesses, der entweder die MILANKOVITCH-Effekte verstärkt oder schwächt in Abhängigkeit von ihren Phasenunterschieden, aber es erscheint unwahrscheinlich, daß abwechselndes langsames Abkühlen und Erwärmen des tiefen Ozeans von sich aus den Vorstoß und Rückgang der Eisdecken ohne äußere Einwirkung verursachen könnten. Man muß auch andere Rückkopplungsmechanismen in Betracht ziehen, wie die Auswirkung der Eisdeckenänderungen auf Albedo, Verdunstung, Wolkenbedeckung und Niederschlag. Es erscheint wahrscheinlich, daß zunehmende Eisbedeckungen mit ihrer höheren Albedo fernerhin Oberflächentemperatur, Verdunstung und Gesamtniederschlag erniedrigen, aber vielleicht den Schneefall entlang der vorrückenden Eiskante verstärken, wobei sie hierdurch Vorsorge für eine positive Rückkopplungsreaktion für ihre weitere Ausdehnung treffen; andererseits wird die verstärkte Oberflächenalbedo schließlich teilweise durch die verminderte Wolkenbedeckung ausgeglichen. Es ist kaum möglich oder sinnvoll, Ursache und Wirkung in solch einem komplexen System nichtlinearer und wechselwirkender Prozesse zu unterscheiden, und unmöglich, resultierende

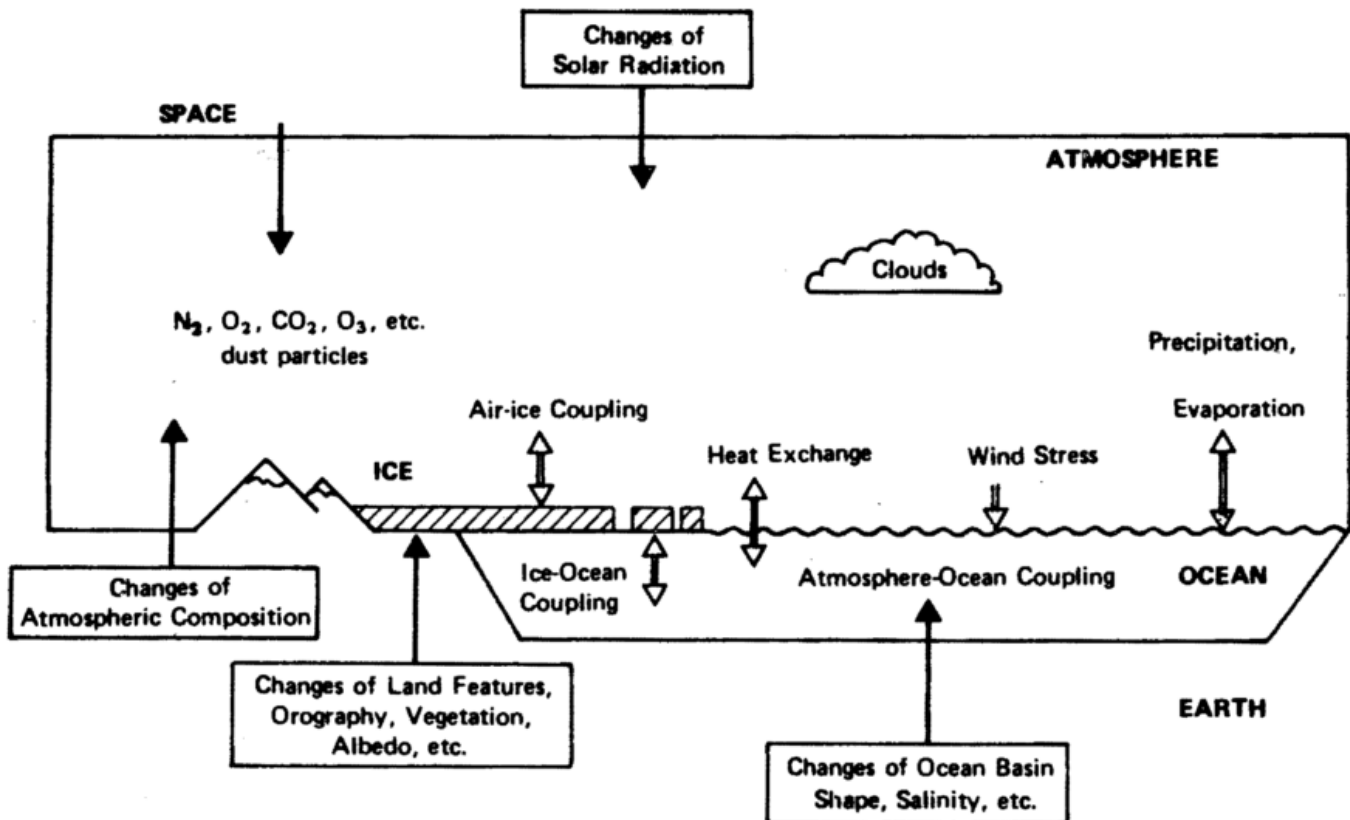


Abb. 12 Die physikalischen Prozesse und Eigentümlichkeiten, die das globale Klima und seine Änderungen beherrschen (aus dem US National Academy Report „Understanding Climatic Change“, 1975)

Effekte vorherzusagen, ohne zu numerischen Modellen Zuflucht zu nehmen, deren Möglichkeiten und Grenzen im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

Unterdessen zeigen die obigen einfachen Rechnungen nachdrücklich an, daß die MILANKOVITCH-Schwankungen von der richtigen Phase und Größenordnung waren, um die Aufeinanderfolge von größeren Vorstößen und Rückzügen der Eisdecken in Gang zu setzen, obwohl diese wahrscheinlich durch den früher erwähnten Mechanismus infolge positiver Rückkopplung gestützt und schließlich durch negative Rückkopplung beendet wurden. Es ist jedoch sehr unwahrscheinlich, daß diese langsamen Schwankungen der Einstrahlung für die einschneidenden klimatischen Fluktuationen viel kürzerer Perioden verantwortlich waren, z. B. Temperaturänderungen von mehreren Graden über nur ein paar hundert Jahre, die sich mehrere Male während der letzten 100 000 Jahre ereigneten. Diese sollten mit größerer Wahrscheinlichkeit aus internen Instabilitäten innerhalb des Klimasystems resultiert haben, vielleicht ausgelöst durch den Verfall des antarktischen Eisdoms, wie es von WILSON (1964, 1969) behauptet wurde. Er weist darauf hin, daß registrierte Änderungen des Meeresspiegels um 15–25 m durch das Abbrechen ungeheurer Eismassen von $6-10 \times 10^6 \text{ km}^3$ Volumen verursacht worden sein konnten, die sich bis 50°S ausbreiteten, wobei die Albedo der Südhalbkugel um vielleicht 7% erhöht und die mittlere Oberflächentemperatur um nicht weniger als 7°C erniedrigt wurde.

6. Das numerische Modellieren des Klimas

Der bei weitem vielversprechendste Zugang zu dem Verständnis und der Vorhersage von Klimaänderungen liegt in der Konstruktion von physikalisch-mathematischen Modellen der Atmosphäre, der Ozeane und der festen Erde, die als ein komplexes geophysikalisches System behandelt werden und die Änderungen der atmosphärischen Zusammensetzung, der Bodenfeuchte, der Vegetation, usw. erlauben. Bedeutender Erfolg wurde in der Entwicklung numerischer Modelle der Atmosphäre zur Vorhersage des Wetters für mehrere Tage im voraus und für die Simulation der globalen Zirkulation der Atmosphäre über Perioden bis zu etwa einem Jahr erzielt. Solche Modelle beruhen auf den Bewegungsgleichungen, den thermodynamischen Gleichungen, den Gleichungen des Wärmetransports durch Strahlung, der Zustandsgleichung der atmosphärischen Gase, einer Kontinuitätsgleichung für den Wassergehalt der Atmosphäre (gasförmig, flüssig und fest) und einer Vorstellung über die Übertragung von Wärme, Feuchte und Bewegungsenergie zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre. Die Prozesse und Mechanismen, die das globale Klima beherrschen, sind in den Abb. 12 und 13 schematisch dargestellt.

Eines der Modelle, das im Meteorological Office durch CORBY u. a. (1972), GILCHRIST u. a. (1973) entwickelt wurde, stellt die globale Atmosphäre in fünf Niveaus dar, die die Troposphäre und untere Stratosphäre mit 4600 Gitterpunkten überspannen, die fast gleichmäßig auf jedes Niveau verteilt sind und so für eine genü-

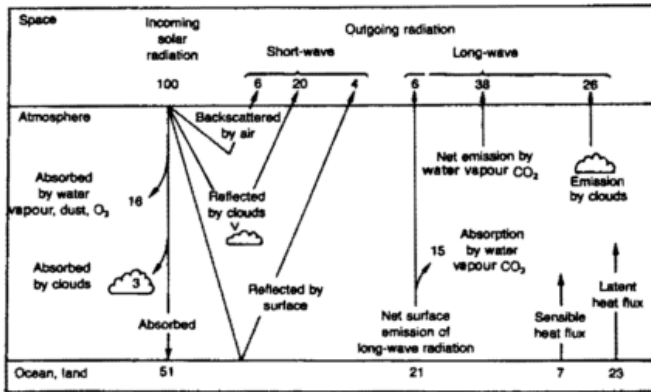


Abb. 13 Das Strahlungsgleichgewicht des Systems Atmosphäre-Erde, das die Neuverteilung der einfallenden Sonnenstrahlung und den Mechanismus zeigt, durch den diese bewirkt wird (aus dem US National Academy Report „Understanding Climatic Change“, 1975)

gende Auflösung sorgen, um die thermische und dynamische Struktur der Atmosphäre und Einzelheiten der größeren vergänglichen Wettersysteme, wie die der Depressionen der mittleren Breiten in befriedigender Weise darzustellen. Die Topographie der Erde und die jahreszeitlichen Schwankungen der Sonnenstrahlung, die an der Grenze der Atmosphäre eindringt, sind vorgeschrieben. Die Temperaturen der Meeresoberfläche sind auf ihren jahreszeitlichen Mittelwerten gehalten, aber die Oberflächentemperaturen über Land werden durch Lösen der einschlägigen Wärmeübergangsgleichungen bestimmt. Der hydrologische Zyklus ist einbezogen, aber in dem Maße vereinfacht, daß Kondensation angenommen wird, wenn die relative Feuchte der Luft 100% überschreitet, und daß von dem Überschuß an Feuchte angenommen wird, daß er als Regen ausfällt, wobei Verdampfung berücksichtigt wird, wenn der Niederschlag durch ungesättigte Luft fällt. Die großmaßstäblichen dynamischen Effekte, die sich aus dem Freiwerden von latenter Kondensationswärme ergeben, werden automatisch berechnet, aber den Wirkungen kleinmaßstäblicher konvektiver Bewegungen wird nur durch rohe statistische Mittelwerte entsprochen.

Eine Schwäche des Modells ist es, daß Art und Bedekungsgrad der Wolken (gesondert vom Niederschlag) nicht berechnet und so die bedeutenden Wechselwirkungen zwischen den Wolken und dem Strahlungsfeld nicht genau dargestellt werden. Da die Ozeane, die ein großes Speicherbecken für Wärme sind, mit ziemlicher Sicherheit eine starke langfristige Beeinflussung auf das Klima ausüben, würde es sehr viel befriedigender sein, ein gekoppeltes Atmosphäre-Ozean-Modell zu benutzen, das die Temperaturen der Meeresoberfläche und ihre Änderungen vorhersagen würde, statt sie vorzuschreiben, aber solche Modelle sind noch in ihren Kinderschuhen, nicht zuletzt weil Strömungen, Temperaturen und Salzgehalt der Ozeane nicht umfassend und ständig gemessen werden.

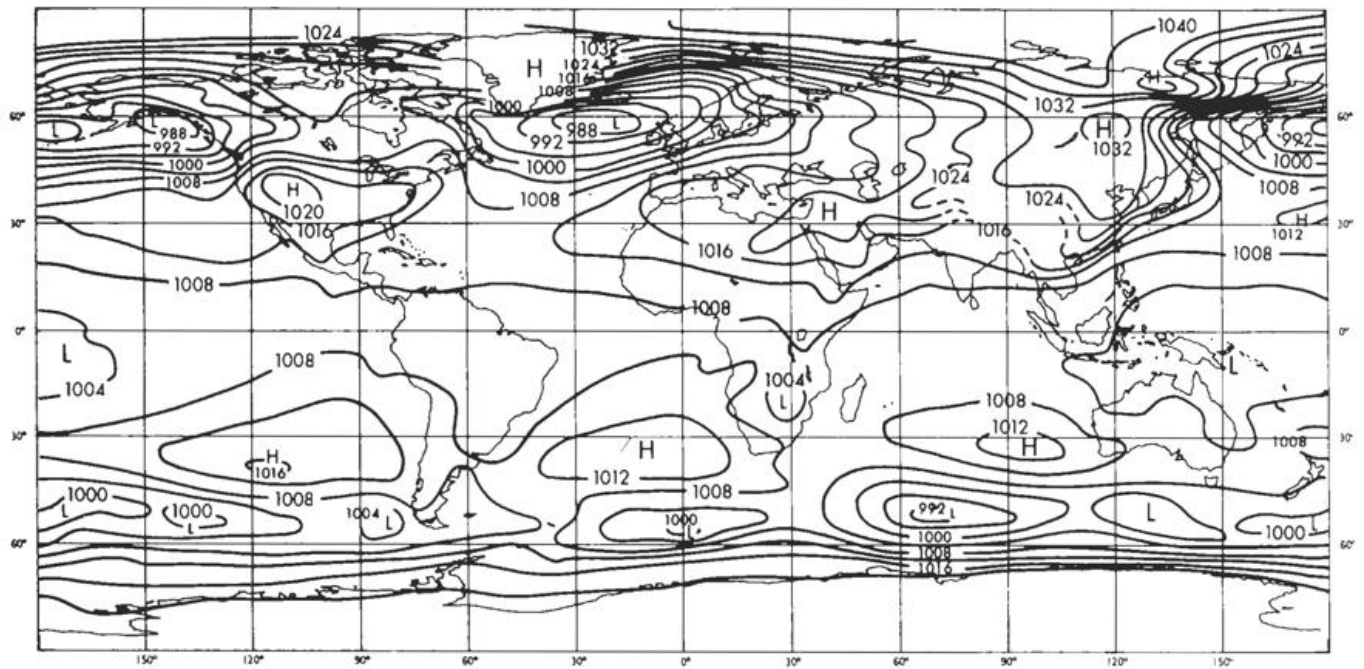
Nichtsdestoweniger simulieren solche Modelle trotz dieser Einschränkungen mit Erfolg die Hauptmerkmale

der atmosphärischen Zirkulation und des Klimas der Erde. Ausgehend von einer beobachteten Anfangssituation oder von einer bewegungslosen, isothermen, trockenen Atmosphäre von einer im einzelnen ausgegebenen Gesamtmasse und Zusammensetzung können die Gleichungen in der Regel in Zeitschritten von 10 Minuten für Perioden der Größenordnung von einem Jahr im voraus integriert werden, ohne daß das Modell dynamisch oder numerisch instabil wird. Unterschiedliche Erwärmung durch die Sonne erzeugt Druckgradienten und als deren Folge Luftbewegungen. Allmählich verstärken sich die Winde, bis vergängliche Wirbel, ähnlich den Zyklonen und Antizyklonen der realen Atmosphäre, erzeugt werden. Diese verteilen Wärme und Feuchte neu und das Modell simuliert bald ganz gut die jahreszeitlichen Verteilungen von Temperatur, Druck, Wind und Regen, wie sie in der wirklichen Atmosphäre beobachtet werden. Nach einer Integration, die sich ungefähr über 50 Tage erstreckt, wofür etwa 10 Stunden auf dem IBM 360/195-Rechner in Anspruch zu nehmen sind, erreicht das Modell einen Zustand des statistischen Gleichgewichts, um Größen zu erzeugen, die, wenn sie über einen Monat gemittelt werden, ziemlich realistisch die Grundzüge des Klimas der Erde wiedergeben.

Abb. 14 (a) und (b) zeigen die berechnete globale Verteilung des Bodendrucks für Januar und Juli, wobei Hochdruckzellen über den Kontinenten (z. B. die sibirische Antizyklone) und Tiefdrucksysteme (z. B. die Island- und Aleutentiefs) über den Ozeanen im Winter erzeugt werden, eine Situation, die im Sommer umgekehrt ist. Die entsprechenden Windfelder, dargestellt durch berechnete Gitterpunktwerte in Abb. 15 (a) und (b), geben die Westwindströmung der mittleren Breiten wieder, die Passate und äquatorialen Stillen zusammen mit den NE-Monsunen über Asien und Ostafrika im Winter, die durch den SW-Monsun im Sommer ersetzt sind. Diese Monsunzirkulationen werden in größeren Einzelheiten in Abb. 16 (a) und (b) gezeigt. Die Kette der Tiefdruckzentren vor der Antarktis, höchst intensiviert während des Südwinters, und die Verstärkung der Westströmung mittlerer Breiten im Winter sind ebenfalls gut simuliert. Die in den Abb. 17 (a) und (b) gezeigte Januar- und Juliverteilung des globalen Regenfalles, obwohl ungenau in Einzelheiten, gibt nichtsdestoweniger die großzügigen Merkmale des Monsuns und der semiariden Gebiete ziemlich gut wieder.

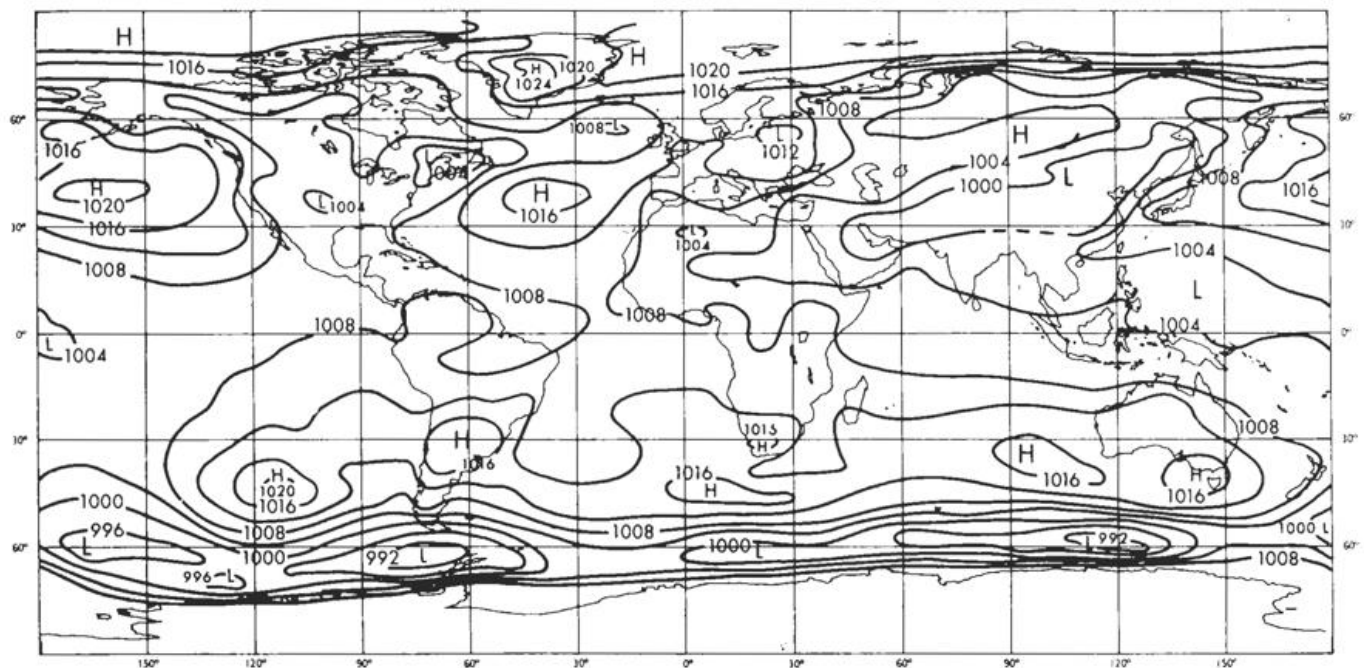
7. Modellieren möglicher Störungen des Klimas

Numerische Modelle des gerade beschriebenen Typs werden jetzt dazu benutzt, um zu entscheiden, wie stabil das Klima in der Reaktion auf denkbare Änderungen äußerer oder innerer, entweder natürlicher oder vom Menschen verursachter Faktoren sein mag. Eine Art des Vorgehens besteht darin, die Empfindlichkeit der statistischen Werte zu testen, die durch das Modell aus Störungen eines bestimmten Parameters erzeugt würden. Um folgerichtige und sinnvolle Ergebnisse zu erzielen, sollte das Modell ein stabiles Gleichgewicht



PRESSURE M.S.L. JANUARY EX.385 MEAN D.61 TO 100

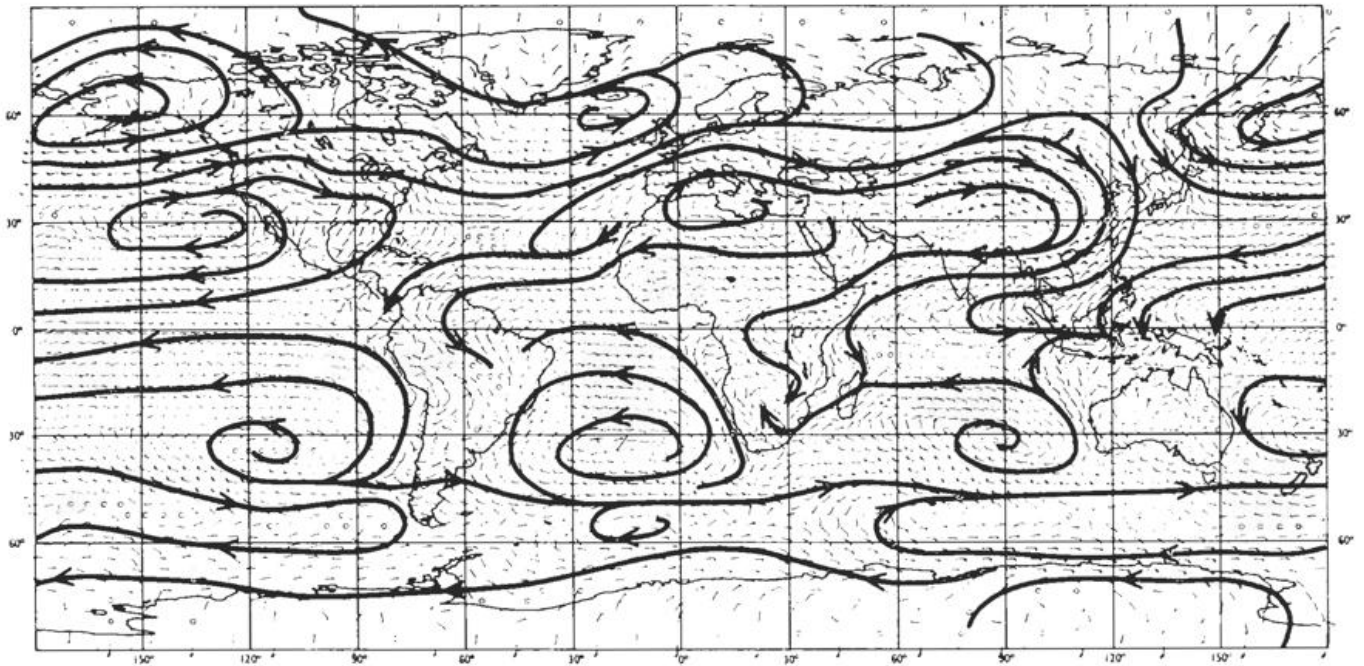
(a)



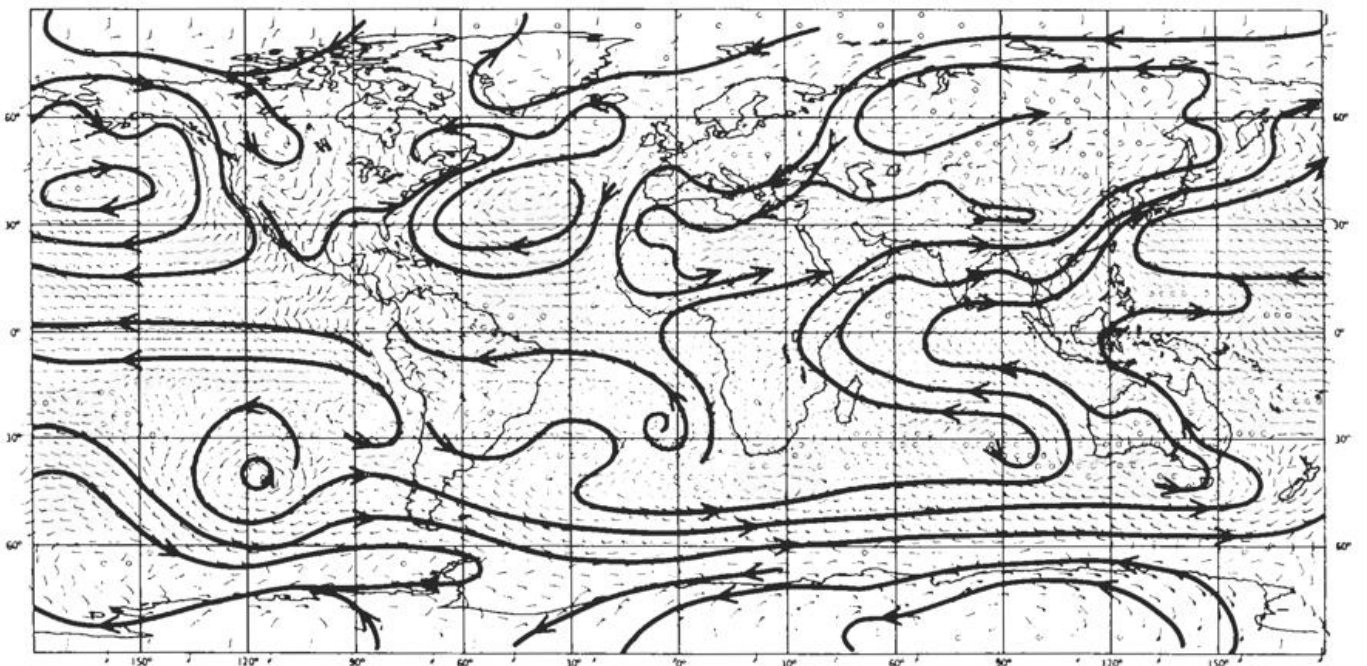
PRESSURE M.S.L. JULY EX.379 MEAN D.61 TO 100

(b)

Abb. 14 Simulation der globalen Verteilung des Luftdrucks im Meeresniveau mit dem 5-Schichten-Modell des Meteorological Office, (a) Januar, (b) Juli

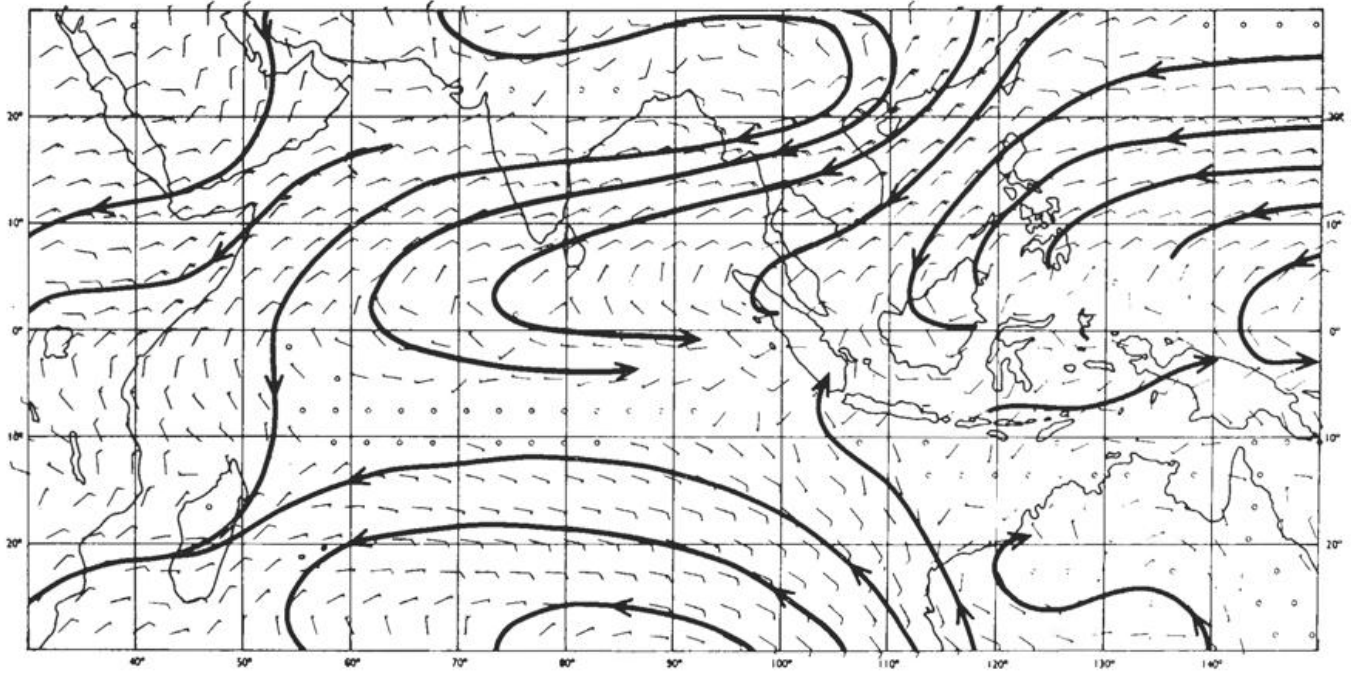


• 9 SIGMA LEVEL WINDS EX. 385 (JAN) D 61 TO 100 MEAN
(a)



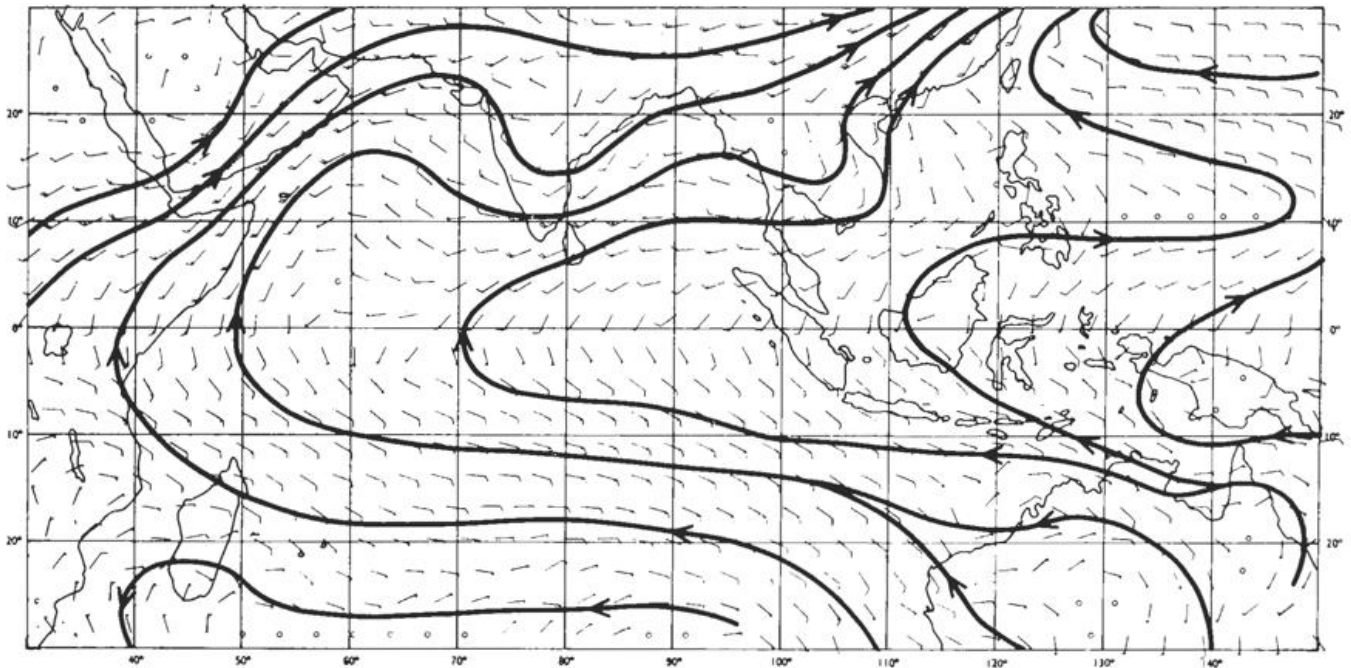
• 9 SIGMA LEVEL WINDS EX. 379 (JULY) D 61 TO 100 MEAN
(b)

Abb. 15 Simulation der globalen Windsysteme für (a) Januar, (b) Juli



• 9 SIGMA LEVEL WINDS EX. 385 (JAN) D61 TO 100 MEAN

(a)



• 9 SIGMA LEVEL WINDS EX. 379 (JULY) D61 TO 100 MEAN

(b)

Abb. 16 Simulation der Monsunzirkulation für (a) Januar, (b) Juli

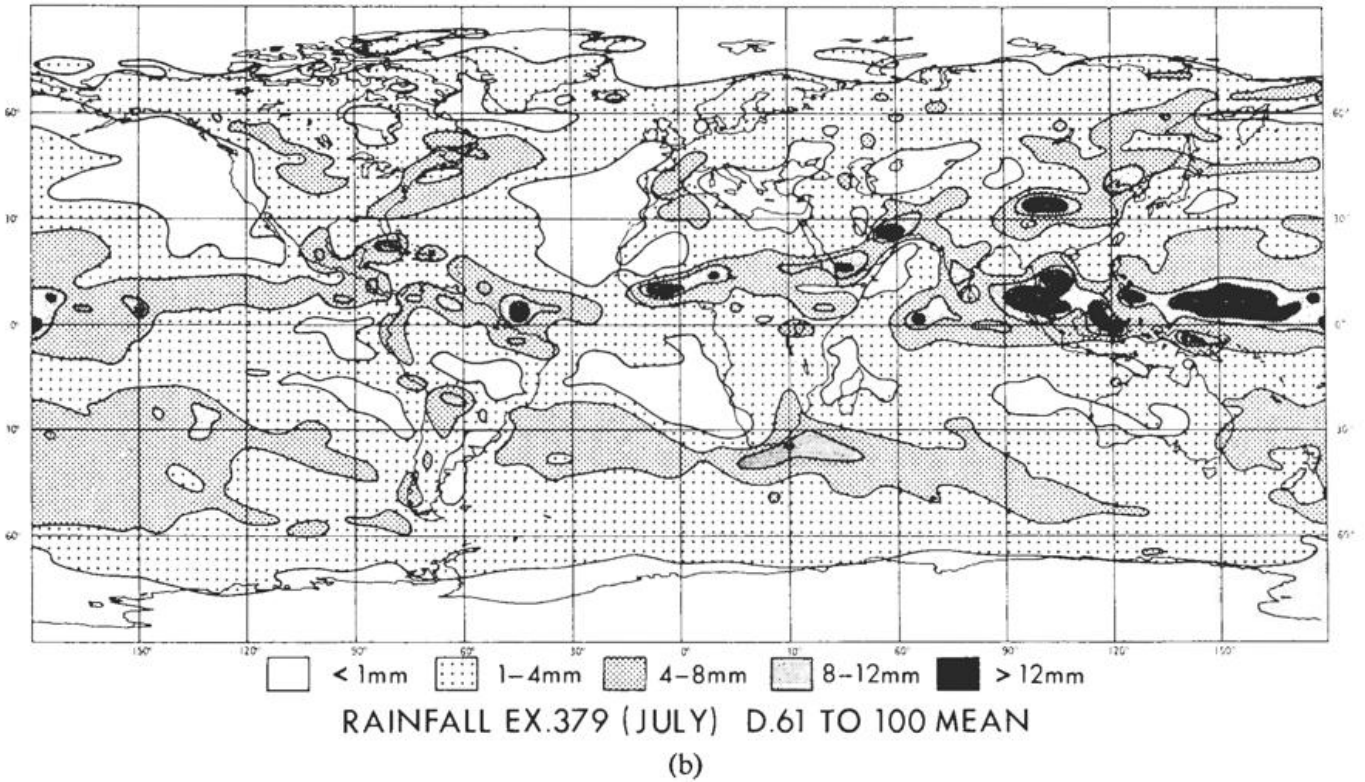
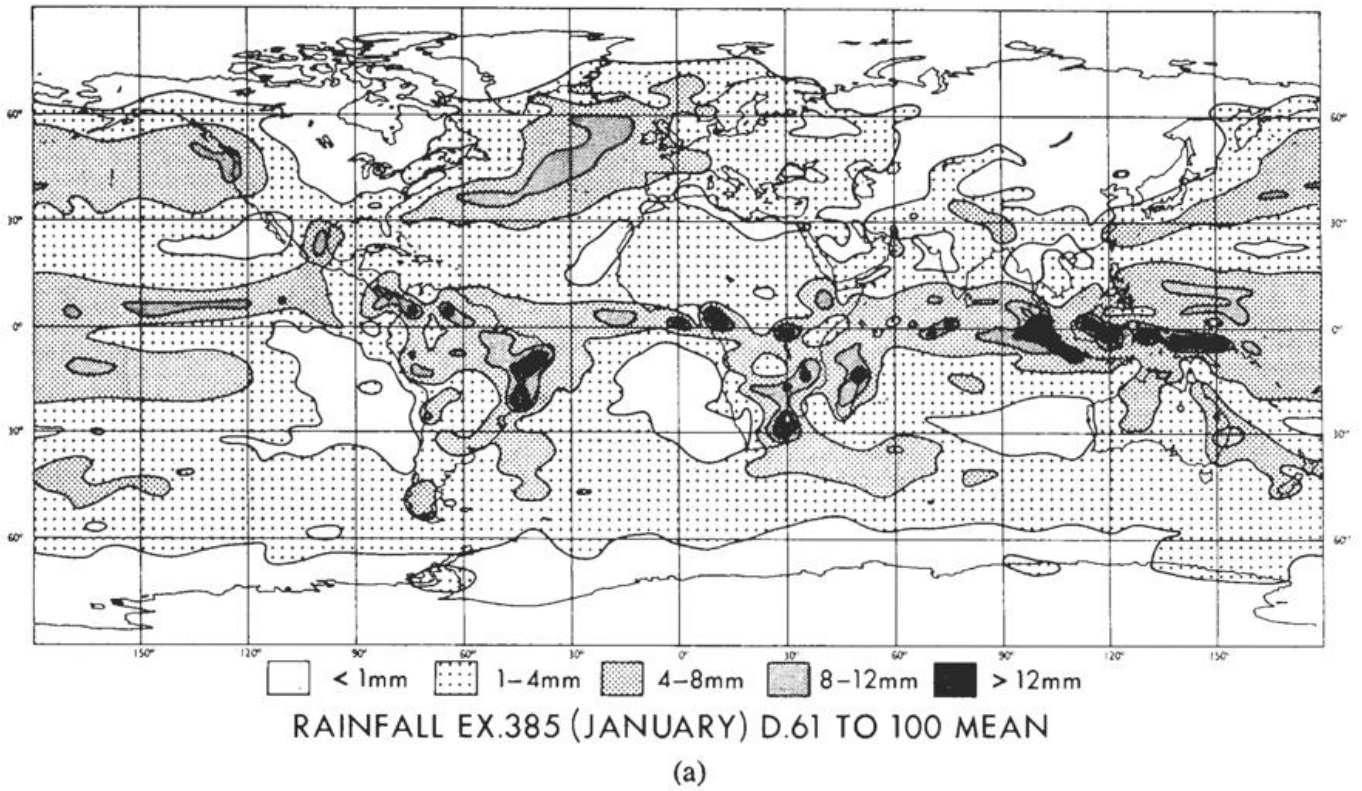


Abb. 17 Simulation der globalen Niederschlagsverteilung für (a) Januar (b) Juli

haben und der Umfang der Störungen sollte nicht groß genug sein, um das Modell-Klima von einem Gleichgewichtszustand zu einem markanten abweichenden Zustand zu verändern, aber doch genügend groß, um bedeutsame Effekte von zufälligen Fluktuationen zu unterscheiden.

Abb. 13, die veranschaulicht, wie die einfallende Strahlung innerhalb der Atmosphäre und an der Erdoberfläche absorbiert, reflektiert und wieder ausgestrahlt wird, weist auf verschiedene Wege hin, auf denen dieses Strahlungsgleichgewicht modifiziert und Änderungen des Klimas erzeugt werden könnten. Diese schließen Schwankungen ein

1. der einfallenden Sonnenstrahlung
2. der Zusammensetzung der Atmosphäre, z. B. des Gehalts an Kohlendioxyd, Staub, Ozon oder Wasserdampf
3. der Wolkenbedeckung
4. der Albedo (Rückstrahlung) von der Erdoberfläche durch Änderung der Bodenfeuchte, Vegetation, Eis- und Schneebedeckung
5. der ozeanischen Zirkulation, die zu Änderungen der Temperatur der Meeresoberfläche und des Transports von Wärme und Feuchte führt
6. der künstlichen Abgabe von großen Mengen von Wärme und Feuchte.

Die Auswirkungen von Änderungen der „Solarkonstanten“ um ein paar Prozent in einem dynamischen globalen Zirkulationsmodell der Atmosphäre wurden in Abschnitt 4 beschrieben. Die Effekte der MILANKOVITCH-Schwankungen sind noch nicht mit einem solchen Modell berechnet worden, aber das Meteorological Office ist dabei, es unter Benutzung eines globalen 5-Schichten-Modells zu versuchen, in das ein volles Schema der Wechselwirkung zwischen Wolken und Strahlung eingebaut ist.*)

Da die gesamte fühlbare Wärme, die durch menschliche Tätigkeiten freigesetzt wird, gegenwärtig weniger als 0,01% der gesamten Sonneneinstrahlung in die Atmosphäre und auf die Erde beträgt, ist es wahrscheinlich, daß die globalen Effekte erheblich unter einem Stand liegen, der entweder berechnet oder sonstwie ermittelt werden kann.

Der Gehalt an Kohlendioxyd in der Atmosphäre hat sich während dieses Jahrhunderts um ungefähr 10% erhöht und steigt laufend um etwa $\frac{1}{2}\%$ pro Jahr entsprechend der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Da die langwellige Strahlung, die von der Erdoberfläche ausgeht, von ihm stark absorbiert wird, sollte eine Zunahme des CO_2 infolge der Glashauswirkung höhere Temperaturen erzeugen. Modellrechnungen, die MANABE und WETHERALD (1975) durchführten, indem sie eine gebietsmäßig begrenzte Version des auf S. 9 beschriebenen Modells benutzten, legen es als wahrscheinlich nahe, daß eine 100%ige Zunahme des CO_2 die gesamte

untere Atmosphäre im Mittel um etwa 3°C erwärmt mit der natürlichen Folgerung, daß eine 10%ige Zunahme die Temperaturen um nur ein paar Zehntel eines Grades erhöhen würde. Innerhalb der nächsten 50 Jahre werden fossile Brennstoffe wahrscheinlich größtenteils erschöpft sein und durch Kernkraftwerke ersetzt werden, die große Mengen von Abwärme in die Atmosphäre freisetzen. Es wird für wahrscheinlich gehalten, daß solche Kraftwerke auf großen schwimmenden Plattformen vor der Küste konzentriert werden, um Seewasser zum Kühlen zu benutzen, und daß ihre Wärmeabgabe ein Vielfaches des lokalen Nettozuflusses an Sonneneinstrahlung sein kann. Ein Experiment, das kürzlich mit einem der Modelle des Meteorological Office angestellt wurde, läßt darauf schließen, daß solch eine konzentrierte Wärmeabgabe in der Größe von $1,5 \cdot 10^{14}$ W über einem Gebiet von $4 \cdot 10^5$ km² oder 375 Wm^{-2} bedeutende Änderungen der Zirkulation und verstärkten Regenfall verursachen würde, die sich auf über 1000 km vom Standort aus in Richtung der Luftströmung erstrecken.

Die Tatsache, daß die Temperaturen der Nordhalbkugel während der Periode 1940—1970 trotz einer ständigen Zunahme der Kohlendioxyd-Konzentration fielen, ist einer gleichzeitigen ständigen Zunahme des Aerosol (Staub)-Anteils der Atmosphäre zugeschrieben worden. Obwohl die atmosphärische Trübung selbst an entlegenen Orten nach 1963 markant zunahm, wodurch die Übertragbarkeit der direkten Sonnenstrahlung um 2% erniedrigt wurde, war dies ziemlich sicher durch einen großen Vulkanausbruch auf Bali verursacht, und jetzt, wo Messungen vorliegen, die fast auf die Werte vor 1963 zurückgehen, gibt es wenig Anzeichen dafür, daß der Staubgehalt noch bedeutend zunimmt. Als Folge der Bali-Eruption stiegen die Temperaturen der unteren Stratosphäre um mehrere Grade, aber es waren keine Wirkungen am Boden zu entdecken. Diese Beobachtung stimmt mit den Ergebnissen eines Experiments mit dem globalen Modell des Meteorological Office überein, das 13 Flächen hat, die sowohl die Troposphäre als auch die Stratosphäre überspannen. Die Einfügung einer stratosphärischen Staubschicht, die ausreichend war, um 4% der einfallenden Sonnenstrahlung aufzufangen, erzeugte örtliche Erwärmungen bis zu 10°C entsprechend der Absorption der Strahlung durch den Staub, aber es gab keine erkennbaren Effekte im Bodenniveau (siehe Abb. 18). Dies unterstützte kaum die These, daß kühlere Epochen der historischen Reihe durch vulkanische Eruptionen verursacht worden sein könnten.

Das gleiche Modell wurde benutzt, um die wahrscheinlichen Effekte aus der Verminderung der Konzentration der stratosphärischen Ozonschicht um bis zu 50% zu untersuchen. Das ergab eine Abkühlung um bis zu 20°C in 40 km Höhe über den Tropen, aber wiederum bedeutungslose Änderungen in der unteren Atmosphäre. Seitdem Untersuchungen, die vom Meteorological Office angestellt wurden, darauf hinweisen, daß mehrere hundert Concordes, von denen jede täglich fünf Stunden fliegt, das Ozon um nicht mehr als $\frac{1}{2}\%$ reduzieren würden (US-Wissenschaftler haben etwa 1% angenommen),

* Siehe Nachtrag

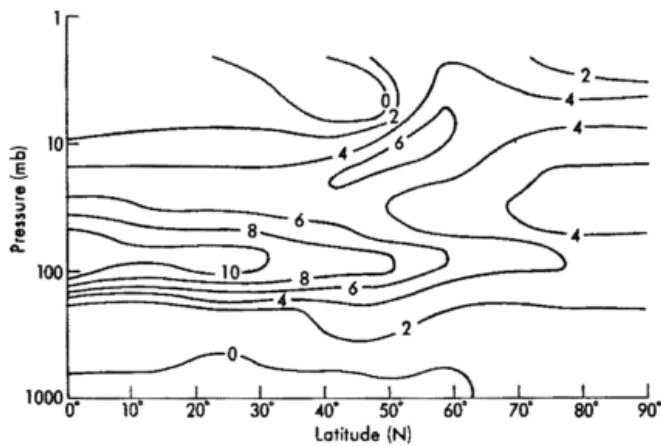


Abb. 18 Änderungen der Lufttemperatur (K), vorhergesagt mit dem globalen 13-Schichten-Modell des Meteorological Office, als Folge der Erzeugung einer künstlichen Dunstschicht in der unteren Stratosphäre, die ausreicht, um 4% der einfallenden Sonnenstrahlung zu absorbieren

und solch eine kleine Verminderung nicht von viel größeren natürlichen Fluktuationen unterschieden werden könnte, ist es unwahrscheinlich, daß der Überschallverkehr während dieses Jahrhunderts einen bedeutenden Effekt auf das Klima hat.

Da die mittlere Albedo (Reflektivität) der Erdoberfläche 35% beträgt, aber von etwa 8% für dunkelgrüne Vegetation bis zu etwa 80% für frisch gefallenen Schnee schwankt, könnten weit ausgedehnte Änderungen in der Vegetation, der Eis-/Schneebedeckung oder der Bodenfeuchte eine bedeutende Änderung der Albedo und von da her des Klimas erzeugen. Alles in allem zielen die menschlichen Betätigungen darauf ab, die Albedo zu erhöhen, und reduzieren so den Bruchteil der Sonnenstrahlung, der für die Erwärmung der Erdoberfläche verfügbar ist. Modellrechnungen weisen darauf hin, daß eine 1%ige Änderung der globalen Albedo eine Änderung von etwa 1 °C der mittleren globalen Temperatur verursachen würde. In einem Experiment mit dem 5-Schichten-Modell des Meteorological Office wurde angenommen, daß die arktische Eisdecke schmilzt und durch eine Wasserfläche von 0 °C ersetzt wird. Die Haupteffekte der Eisbeseitigung bestanden, abgesehen von der augenfälligen Erwärmung der polaren Troposphäre, darin, die Intensität der polaren Antizyklone abzuschwächen, die Stärke der Westströmung der mittleren Breiten und ihrer zugehörigen Depressionen zu verringern und eine bedeutende Abkühlung bis zu 8 °C in den mittleren Breiten, besonders über den Vereinigten Staaten, dem östlichen Sibirien und westlichen Europa zu erzeugen.

In diesem Stadium sollten die Ergebnisse solcher Modelleexperimente eher als hinweisend denn als endgültig angesehen werden, zum Teil deshalb, weil die Modelle noch ernstliche Mängel haben, insofern als sie strenggenommen weder die Wechselwirkungen zwischen Wolken und Strahlungsfeld noch die Änderungen der Oberflächenschichten der Ozeane und ihre Wechselwirkung mit der Atmosphäre berücksichtigen.

Der Einfluß von Anomalien der Temperatur der Meeresoberfläche auf die atmosphärische Zirkulation ist in ziemlich Einzelheiten von ROWNTREE (1976) unter Benutzung des 5-Flächen-Modells des Meteorological Office untersucht worden. Während des Winters 1962/63, des kältesten in Großbritannien seit 250 Jahren, war ein großes Gebiet des östlichen tropischen Ozeans bis zu 2,5 °C wärmer als normal. Als diese Anomalie in das Modell eingegeben wurde, lieferte es ein Gebiet tiefen Bodendruckes, das im Westen der Biskaya lag, und bei einem Versuch ein ausgedehntes Gebiet hohen Druckes, das genau östlich von Grönland lag. Die modifizierte Zirkulation hatte eine starke östliche Luftströmung über den britischen Inseln zur Folge, die an jene erinnerte, die den sehr kalten Winter 1962/63 hervorrief.

8. Vorhersage klimatischer Schwankungen

Wenn wir das Klima als die statistischen Eigenschaften der Atmosphäre definieren, die über ein Zusammenwirken aller Zustände gemittelt sind, die sich innerhalb einer langen aber endlichen Zeitspanne ereignen, während der sich die Atmosphäre an langsam sich ändernde äußere Bedingungen anpaßt, so beschäftigt sich die Klimavorhersage mit der Entscheidung, wie sich diese statistischen Maßzahlen ändern werden, wenn die Zeitspanne fortschreitet und die äußeren Bedingungen sich ändern.

Wenn auch ein Modell die wesentlichen Züge des bestehenden Klimas (oder irgend eines anderen quasi-Gleichgewichts) recht gut *simulieren* mag, so folgt daraus nicht notwendigerweise, daß es dazu fähig ist, eine einzigartige Folge klimatischer Ereignisse aus einer gegebenen Störung dieses Gleichgewichtszustandes *vorherzusagen*. Der Grad der Vorhersagbarkeit wird von dem Grade abhängig, bis zu dem diese Ereignisse ausschließlich durch die Grenzbedingungen und von außen einwirkenden Faktoren bestimmt und in welchem Ausmaß sie durch interne Fluktuationen innerhalb des Klimasystems selbst beeinflusst werden.

Vorkämpfer dynamischer Modelle neigen dazu, Klimaänderung als ein initiales Grenzwertproblem der Strömungsdynamik anzusehen, das, bei festgelegten äußeren Grenzbedingungen, zu einer deterministischen Lösung befähigt ist, d. h. einem Gleichgewichtsklima mit vom anfänglichen Zustand unabhängigen statistischen Maßzahlen. Von einer Klimaänderung wird erwartet, daß sie nur aus einer Änderung der äußeren oder der Grenzbedingungen herrührt, aber selbst dann könnte eine nützliche Vorhersage nur gemacht werden, wenn die äußeren Bedingungen selbst vorhersagbar wären, und Umfang und Genauigkeit der Vorhersage würden von der Amplitude und Ausdehnung des von außen kommenden Anreizes im Verhältnis zu dem innerhalb des Klimasystems erzeugten Lärms abhängen. Gerade die am meisten fortgeschrittenen der gegenwärtigen dynamischen Modelle sind, obwohl sie durch festgelegte oder sich nur langsam ändernde Grenzbedingungen stark eingengt sind, nicht völlig deterministisch in dem

Sinne, daß das gleiche Modell, das von ziemlich unterschiedlichen Anfangszuständen ausgeht, fähig ist, ziemlich unterschiedliche Sätze von klimatologischen Maßzahlen zu liefern, deren Unterschiede die gesuchten Effekte verbergen können. Folglich sind die Modelle, obwohl sie genügend realistisch und robust sind, um die wahrscheinlichen klimatischen Effekte großer Änderungen der Eingangsparameter *anzuzeigen*, nicht fähig, die quantitativen Effekte verhältnismäßig kleiner Störungen *vorherzusagen*. Bis zu welchem Ausmaß diese Unbestimmbarkeit eine Folge der Unzulänglichkeit des Modells ist und bis zu welchem Ausmaß sie eine angeborene Eigenschaft eines Systems ist, das nichtlineare Wechselwirkungen zwischen vielen Prozessen einschließt, die innerhalb ausgedehnter Zeitskalen ablaufen, wird überzeugender durch umfassendes Experimentieren als durch philosophische Beweisführungen entschieden werden. Aber selbst wenn dynamische Modelle eine einzigartige Serie von Reaktionen auf eine gegebene Folge von äußeren Anreizen vorherzusagen sollten, ist da noch die Möglichkeit, daß das *reale* Klimasystem befähigt sein kann, in zwei (oder mehr) quasistabilen Formen zu existieren und sich ziemlich abrupt von einem solchen Zustand in einen anderen zu verwandeln. Die in Abb. 1 dargestellten Übergänge zwischen glazialen und interglazialen Epochen sind für solche Änderungen bezeichnend. Ob diese von außen angeregt werden, wie in Abschnitt 5 dargelegt, oder ob sie spontan aus internen Umstrukturierungen des Klimasystems entstehen können, wird wiederum den Einsatz von Rechenmodellen über sehr lange Zeiträume erfordern mit dem davon abhängigen Risiko, daß sie aus rechentechnischen Gründen instabil werden.

Unterdessen sind gerade Versuche im Gange, um den unermesslichen Bedarf an Rechenleistung, der für explizite dynamische Modelle benötigt wird, durch die Entwicklung statistisch-dynamischer Modelle zu verhindern, in denen die Eigenschaften und der Aufbau individueller großer Wirbel (z. B. Zyklonen) nicht explizit berechnet, sondern in denen ihre Transporteigenschaften in Termen der großmaßstäblichen Merkmale der Wind- und Temperaturfelder parameterisiert würden.

Jedoch gibt es beträchtliche Schwierigkeiten für dieses Verfahren, und es würden viele Ergebnisse detaillierter globaler Zirkulationsmodelle benötigt werden, um die Parameterisierung durchzuführen. Da überdies die Zyklonen, die für die Umwandlung von potentieller in kinetische Energie so wichtig sind, dazu neigen, in einfachen Modellen mit geringer Auflösung unterdrückt zu werden, ist es schwierig, sich ein realistisches Klimamodell vorzustellen, das sich nicht gründlich mit ihnen befaßt. Aber es kann sein, daß Modelle geringer Auflösung mit geschickter Parameterisierung der ungelösten Skalen die Hauptfelder und den wichtigen Wirbeltransport mit genügender Genauigkeit bestimmen können, um dadurch *anzuzeigen*, wie das Klima auf identifizierbare langfristige Schwankungen der äußeren Einwirkungen und der Grenzbedingungen reagieren wird, selbst wenn sie unfähig sind, kleinere und feinere Fluktuationen vorherzusagen, die nichtsdestoweniger ernste wirtschaftliche Folgen haben können.

nen vorherzusagen, die nichtsdestoweniger ernste wirtschaftliche Folgen haben können.

Für die nähere Zukunft sollte vermutlich der Anwendung von Modellen der Vorrang gegeben werden, um die Empfindlichkeit zu testen, mit der die Atmosphäre auf Änderungen individueller Parameter reagiert, um die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen aufzuhellen und um wahrscheinliche Änderungen im Verhalten der Atmosphäre von den Eigenarten einzelner Modelle zu unterscheiden.

Nachtrag

Einbeziehung des MILANKOVITCH-Effekts in ein globales Zirkulationsmodell

(Die Ergebnisse dieser Rechnungen wurden auf der Tagung durch Mr. A. GILCHRIST vorgelegt).

Um sich einen Hinweis auf die Wirkungen von Schwankungen der Parameter der Erdumlaufbahn auf die Temperaturen während des Nord-Sommers zu verschaffen, sind zwei Integrationen vorgenommen worden, wobei eine globale Version des 5-Schichten-Modells der allgemeinen Zirkulation des Meteorological Office benutzt wurde, in das die Änderungen, die FRANCIS (1975) vornahm, und ein wechselwirkendes Strahlungsschema mit drei Wolken-schichten eingebaut wurden. Die beiden Integrationen erstreckten sich über 60 Tage, die Mai und Juni repräsentierten, und benutzten verschiedene Parameter der Erdumlaufbahn, die dem heutigen Tag und dem Jahr 10 000 vor der Gegenwart entsprechen, wie sie in der Tabelle angegeben sind.

	heute	vor 10 000 Jahren
Exzentrizität	.0167	.0190
Länge des Perihels	249°	102°
Schiefe	23.45°	24.22°

Der Effekt der beiden ersten Änderungen war, daß zur Sommersonnenwende die Erde etwa 7% mehr Sonnenstrahlung als heute erhielt bei einer mittleren Jahres-Netto-Einstrahlung, die im Grunde genommen unverändert war; die Änderung der Schiefe vermehrte die jährliche Strahlung an den Polen um etwa 3% mit kleinen Verminderungen in den Tropen. Um zu vermeiden, daß der thermische Aufbau des Modells durch die Ausgangstemperaturen der Meresoberfläche bestimmt wurde, wurde dem Ozean eine Tiefe von 2 Metern zuerkannt; dies erlaubte ohne Zweifel eine stärkere atmosphärische Reaktion, als sie mit einem geeigneten Ozean-Modell erhalten worden wäre, das mit dem Atmosphären-Modell über viele Jahre in Wechselwirkung stehen würde. Gemittelt über die Tage 51—60 (Ende Juni) waren die Werte des Maschinenlaufs für das Jahr 10 000 vor der Gegenwart wärmer als die des Laufs für die Gegenwart, und zwar durch die gesamte Atmosphäre hindurch mit Unterschieden, die von 6 °C über der Arktis bis 4 °C bei 30 °N, 2 °C bei 30 °S und 0 °C am Südpol reichten.

Literatur (zitiert nach Original)

- Budyko, M. I. (1969)
Corby, G. A., Gilchrist, A. and Newson, R. L. (1972)
Daansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B. and Langway, C. C. (1971)
Francis, P. E. (1975)
Gilchrist, A., Corby, G. A. and Newson, R. L. (1973)
Joint Organizing Committee for GARP (1975)
- King, J. W. (1973)
King, J. W. et al. (1974)
Maksimov, I. V. and Slepcev-Sevlevic, B. A. (1971)
Manabe, S. and Wetherald, R. T. (1975)
Milankovitch, M. (1930)
- Milankovitch, M. (1938)
Miles, M. K. (1974)
- Newell, R. E. (1974)
Painting, D. J. (1976)
Rowntree, P. R. (1976)
Sawyer, J. S. (1966)
Shackleton, N. J. and Opdyke, N. D. (1973)
Shaw, D. M. and Donn, W. L. (1968)
United States National Academy of Sciences (1975)
Vernekar, A. D. (1972)
Wetherald, R. T. and Manabe, S. (1975)
Wilson, A. T. (1964)
Wilson, A. T. (1969)
- Tellus, 21, p. 611.
Quart. J. R. Met. Soc., 98, p. 809.
Late Cenozoic Glacial Ages (Ed. K. Turekian, Yale University Press), pp. 37—56.
Quart. J. R. Met. Soc., 101, pp. 567—582.
Ibid., 99, p. 2.
The physical basis of climate and climate modelling. GARP Pub. Series, No. 16 (WMO Geneva).
Nature (London), 245, pp. 443—446.
Ibid., 252, pp. 2—3.
Moscow Akad. Nauk., Doklady, 201, pp. 339—341.
J. Atmos. Sci., 32, p. 3.
Handbuch der Klimatologie I, Teil, A. (Ed. Koppen and Geiger), Berlin.
Handbuch der Geophysik, Berlin, 9, p. 593.
Meteorological Office, Meteorological Research Committee Paper, No. 352.
Quaternary Research, 4, p. 117.
Meteorological Office Research Paper. No. 35 in press.
Quart. J. R. Met. Soc., 102, pp. 607—625.
World Climate from 8000 to 0 BC, R. Met. Soc., p. 218.
Quaternary Research, 3, p. 39.
Science, 162, p. 1270.
Understanding climatic change.
Met. Mon., 12, No. 34 (Amer. Met. Soc. Boston).
J. Atmos. Sci., 32, p. 2044.
Nature (London), 201, p. 147.
Can. J. Earth Sci., 6, p. 911.

2

WELTORGANISATION FÜR METEOROLOGIE (WMO), Genf

Technischer Bericht der Expertengruppe des WMO Executive Committee über Klimaveränderungen

Vorbemerkung

Die Ergebnisse einer vom Exekutiv-Ausschuß (EC) der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) eingesetzten Expertengruppe, die sich mit dem Problem der Klimaänderungen beschäftigt, wurden auf der XXVIII. Sitzung des EC in Form eines allgemeinen „WMO Statement on Climatic Change“ und dem beigegeführten „Technical Report by the WMO Executive Committee Panel of Experts on Climatic Change“ im Juni 1976 gebilligt. Da der „Technische Bericht . . .“ wesentlich ausführlicher und konkreter das Problem der Klimaänderungen behandelt, wird nachfolgend nur dieser — wegen seiner grundsätzlichen Bedeutung und als Ergänzung des Hauptbeitrages von B. J. MASON — in deutscher Übersetzung wiedergegeben.

Auf der 3. Sitzung des EC Panel of Experts on Climatic Change (Genf, 21.—25. Februar 1977) wurde festgestellt, daß beide Dokumente (Statement und Technical Report) in ihrer Substanz keiner Änderungen bzw. Zusätze bedürfen.

Red.

Die Klimaverhältnisse der Vergangenheit

1. Die letzten rund zwei Millionen Jahre waren gekennzeichnet durch eine lange Abfolge von eiszeitlichen und zwischeneiszeitlichen Klimaverhältnissen, wobei die Eiszeiten in Abständen von etwa 100.000 Jahren wiederzukehren pflegten. In den letzten 8000 Jahren befand sich die Erde in einer vergleichsweise warmen zwischen-eiszeitlichen Phase innerhalb dieser Eiszeitenfolge mit weniger Eis (das meiste davon in der Eiskecke von Grönland und der Antarktis) als in den letzten 100.000 Jahren. Die Temperaturen in mittleren Breitengraden sind heute um 5—8 °C höher und der Meeresspiegel liegt um 80—100 m über den Werten, die für die extremen Phasen der Eiszeit, wie zum Beispiel der Phase des Hochwürm vor 18 000 Jahren, zu veranschlagen sind.

2. Nach Ablauf der letzten eiszeitlichen Phase vor etwa 8000 bis 10 000 Jahren hat sich das Klima der Erde innerhalb viel kürzerer Zeiträume immer wieder verändert, was anhand einer Reihe von paläoklimatischen Indikatoren festgestellt werden konnte. Zum Teil waren die nacheiszeitlichen Klimaveränderungen mit Ausdehnungen und Schrumpfungen der polaren Eiskappen und der Berggletscher innerhalb von Zeiträumen von etwa 2000—3000 Jahren verbunden („neoglazialer Zyklus“). Die „Kleine Eiszeit“ mit Temperaturen, die um etwa 1 bis 2 °C unter den heutigen lagen und stürmischen Wetterverhältnissen im Nordatlantik — eine Zeit, die von etwa 1550—1850 anhielt — war eine Phase des neoglazialen Zyklus.

3. Seit der „Kleinen Eiszeit“ hat sich die Erde insgesamt um etwa 1 °C erwärmt, doch die Geschwindigkeit, mit der diese Erwärmung stattfand, war ungleichmäßig, und es ist nicht sicher, ob die Kleine Eiszeit schon voll abgelaufen ist oder nicht. Die Erwärmung war besonders deutlich in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, wobei die Temperaturen im Sektor der atlantischen Arktis am schnellsten stiegen (innerhalb von 50 Jahren um mehrere Grad C). Die meteorologischen Daten zeigen, daß sich die Windgürtel und bevorzugten Zugrichtungen der nördlichen Hemisphäre damals etwas zur Arktis hin verschoben, ähnlich wie die Nordwärts-Verschiebung der Klimazonen vom Winterhalbjahr zum Sommerhalbjahr. Für entsprechende Vorgänge in der südlichen Hemisphäre gibt es weniger eindeutige Nachweise.

4. Allgemein läßt sich sagen, daß die für die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts charakteristische Entwicklung der Klimaverhältnisse offensichtlich die Richtung gewechselt hat — zumindest in der nördlichen Hemisphäre. Die Temperaturen sind gesunken, insbesondere in der Arktis und in den atlantischen Randzonen der Arktis (in einigen Gebieten um mehrere Grad Celsius), wo das Meereis wieder zugenommen hat. Die Luftströmungen in der nördlichen Hemisphäre scheinen sich seit dieser Zeit wieder in umgekehrter Richtung entwickelt zu haben und ähneln dem entsprechenden Verlauf in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, wobei in vielen Gebieten eine Tendenz zu stärkeren Witterungsschwankungen zu beobachten ist. Diese Veränderungen sind vielleicht schon wieder im Schwinden begriffen, wenn sie in den letzten paar Jahren nicht schon wieder die entgegengesetzte Richtung eingeschlagen haben.

5. In den letzten Jahren waren auch schwere Dürrekatastrophen, wie z. B. im Sahel-Gebiet in Afrika, zu beobachten, Verschiebungen des tropischen Monsungürtels und sonstige extreme Ereignisse in anderen Teilen der Welt. Es ist nicht klar, in welchem Umfang diese Entwicklungen miteinander in Zusammenhang stehen und eine weltweit korrelierte Klimaveränderung anzeigen. Auf jeden Fall machen sie die manchmal erheblichen Schwankungen deutlich, die das Klima innerhalb eines zeitlichen Rahmens von Monaten, Jahren und Jahrzehnten kennzeichnen.

Physikalische Ursachen von Klimaschwankungen

6. Der gegenwärtige Stand des Wissens im Hinblick auf die Ursachen von Klimaschwankungen ist als rudimentär zu bezeichnen. Verschiedenste physikalische Vorgänge wurden als Möglichkeiten vermutet. Die Schwierigkeit bestand darin herauszufinden, welche dieser Vorgänge in Frage kommen und festzustellen, in welchem Umfang jeder einzelne davon zur Gesamtheit der beobachteten Schwankungen beiträgt. Die Entwicklung ausreichend fundierter numerischer Modelle des gesamten Klimasystems — ein Postulat, das bisher nicht erreicht wurde — wird als nötige (wenn auch nicht unbedingt ausreichende) Voraussetzung für eine verlässliche Beurteilung der Ursachen von Klimaveränderungen erachtet. Es wird dabei eingeräumt, daß die relative Bedeutung dieser Ursachen je nach Bezugszeitraum verschieden ist.

7. Der Begriff „**Klimasystem**“ bezieht sich auf die

Atmosphäre, die Meere, die Schnee-, und Eismassen, die Landflächen und die Vegetation, deren vielfältige und komplexe physikalische und chemische Verkettungen bei der Entstehung des klimatischen Gesamtgefüges der Erde eine wichtige Rolle spielen.

8. Klimatische Schwankungen und Veränderungen können sich zum Teil aus Faktoren innerhalb des Klimasystems ergeben. Es gibt viele mögliche Arten von Mechanismen, die eine Variabilität innerhalb des Systems über sehr viele verschiedene Zeiträume hinweg verursachen können. Diese folgen unmittelbar aus den völlig nicht-linearen Wechselwirkungen (sogenannten feedbacks) zwischen den verschiedenen Elementen des Klimasystems und den höchst unterschiedlichen Reaktionszeiten der verschiedenen Bestandteile.

9. Klimaschwankungen können sich auch teilweise aus Veränderungen außerhalb des Klimasystems ergeben. Bekannte Beispiele dafür sind die Schwankungen der ausgesandten Strahlungsenergie der Sonne (das tatsächliche Ausmaß dieser Schwankungen steht noch nicht fest), Schwankungen des Staubanteils der oberen Atmosphäre aufgrund von Vulkanausbrüchen und die Ansammlung von Kohlendioxid in der Atmosphäre durch die Verwendung fossiler Brennstoffe.

10. Ein anschauliches Beispiel für die Wechselwirkungen — ein Faktor der wahrscheinlich in erheblichem Umfang zur Variabilität des Klimasystems beiträgt — ist die Wechselwirkung zwischen Schneedecke, Reflexion der Sonnenstrahlung und Lufttemperatur. Erfolgt ein geringfügiger Temperaturabfall, der die Entstehung einer Schneedecke begünstigt, bewirkt die stärkere Reflexion der Sonnenstrahlung durch den Schnee eine örtliche Verringerung der Erwärmung der Erdoberfläche und der Atmosphäre durch die Sonne. Die verringerte Erwärmung läßt dann ihrerseits die Lufttemperatur noch weiter absinken. Als Folge davon bleibt der Schnee liegen, und vielleicht werden weitere Schneefälle in einem größeren Gebiet begünstigt. Eine ähnliche, aber in entgegengesetzter Richtung verlaufende Reaktionskette ist zu beobachten, wenn der Ausgangspunkt eine geringfügige Erhöhung der Temperatur ist. Im Endeffekt ergibt sich sowohl eine Verstärkung leichter klimatischer Störungen als auch eine Verlängerung derselben.

11. Es wäre jedoch unrealistisch, einen der verschiedenen Mechanismen, die Klimaschwankungen zugrundeliegen können, getrennt von anderen Mechanismen zu betrachten, die ebenfalls vorhanden sein können. Alle zusammen müssen innerhalb eines entsprechenden allgemeinen physikalischen Rahmens Berücksichtigung finden, bevor ein Anspruch auf eine wirklich plausible Erklärung klimatischer Veränderungen erhoben werden kann. Wir haben noch kein klares Bild von all den Mechanismen, die beteiligt sein können, und wir sind uns noch nicht darüber im klaren, was denn nun ein geeigneter allgemeiner physikalischer Rahmen zur Erfassung dieser Mechanismen wäre. Diese Unzulänglichkeiten lassen erahnen, wie schwierig es ist, numerische Klimamodelle zu entwickeln, von denen mit einiger Berechtigung erwartet werden kann, daß sie die wesentlichen Grundzüge des Klimasystems simulieren.

Der Einfluß des Menschen auf das Klima

12. Viele Wissenschaftler sind der Ansicht, daß die menschlichen Aktivitäten auf verschiedene Weise die Klimaveränderungen bewirken, die jetzt bzw. in der Zukunft stattfinden. Auf örtlicher Ebene, wie z. B. in Stadtgebieten, ist die anthropogene Komponente von Klimaveränderungen eine nachweisbare Realität. Die relative Wärme großer Städte, bekannt als der „städtische Wärmeinseleffekt“, ist ein gut belegtes Beispiel dafür. Die anthropogenen Wirkungen im größeren geographischen Maßstab werden gegenwärtig im allgemeinen im Vergleich zum Ausmaß natürlicher Klimaschwankungen für gering gehalten, sind aber dennoch als potentiell sehr wichtige Faktoren für die Veränderungen des natürlichen Ablaufs des großräumigen Klimas im Verlaufe des nächsten bzw. der nächsten beiden Jahrhunderte anzusehen.

13. Die weltweite Zunahme des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre, die durch Beobachtungen auf der ganzen Welt schon jetzt eindeutig nachgewiesen werden konnte und seit dem Ende des 19. Jahrhunderts mindestens 10% betrug, läßt sich verlässlich auf die Verwendung fossiler Brennstoffe zurückführen. Werden die meisten bekannten Reserven dieser Brennstoffe im nächsten Jahrhundert bzw. in den nächsten beiden Jahrhunderten verbraucht, was nun möglich erscheint, würden die Kohlendioxidkonzentrationen wahrscheinlich auf ein Mehrfaches der bisherigen Werte steigen. Nach bestem gegenwärtig vorhandenem Wissen würde dies bedeuten, daß ein so starker Kohlendioxidanstieg eine erhebliche Erwärmung der Erde, nämlich um mehrere Grad Celsius, bewirken würde und daß diese Temperaturerhöhung wegen des langsamen Verlaufes der Beseitigung von Kohlendioxid noch viele Jahrhunderte bestehen bliebe, nachdem die fossilen Brennstoffreserven schon im wesentlichen erschöpft wären. Weitere klimatische Auswirkungen, die im einzelnen noch schwer überschaubar sind, wären ebenfalls zu erwarten.

14. Die bei Energieerzeugung und -verbrauch in die Umwelt gelangende Energie, gleich, ob es sich um fossile oder nukleare Brennstoffe handelt, kann ebenfalls zu einer erheblichen Erwärmung führen, obwohl dies kaum Anlaß zu Besorgnis geben dürfte, außer wenn der Energiebedarf der Gesellschaft um einen Faktor 10 oder mehr steigt, was im Laufe des kommenden Jahrhunderts der Fall sein könnte.

15. Die Bedeutung weiterer anthropogener Faktoren, z. B. der Einfluß der zunehmenden Verschmutzung der Atmosphäre durch Stickstoffoxide bzw. Chlorverbindungen (z. B. Chlorfluormethane) auf das zukünftige Klima ist bisher relativ ungewiß. Eine weitere Untersuchung dieser Fragenkomplexe ist zu befürworten.

16. Außer im Hinblick auf örtliche Veränderungen lassen die Beobachtungen bisher nicht eindeutig darauf schließen, daß menschliche Einflüsse irgendwelcher Art ungewöhnliche klimatische Veränderungen irgendwo auf der Welt ausgelöst hätten. Dies überrascht nicht, wenn man bedenkt, wie groß die natürliche Variabilität des Klimas ist, die es schwierig macht, den Einfluß des Menschen zu erkennen. Dennoch besteht kein Grund zur

Selbstgefälligkeit im Hinblick auf die potentiell schwerwiegenden Folgen, die die Aktivitäten des Menschen in Zukunft heraufbeschwören könnten.

Beurteilung des Klimaverlaufs in den nächsten 100 bis 200 Jahren

17. In den letzten Jahren wurden bei der Entwicklung einer quantitativen Klimatheorie große Fortschritte erzielt durch eine Kombination mathematischer Klimamodelle und die Beobachtung der physikalischen Vorgänge, von denen man glaubt, daß sie das Gesamtverhalten der Atmosphäre und der Meere bestimmen. Im Rahmen dieser Entwicklungsarbeiten wurden einigermaßen zutreffende Simulationsmodelle der atmosphärischen Komponenten des Klimasystems erarbeitet. Doch man hat erkannt, daß sie zur Erforschung vieler wichtiger Aspekte der klimatischen Variabilität einschließlich der Vorhersagbarkeit des Klimas noch nicht ausreichen.

18. Zum jetzigen Zeitpunkt kann nur sehr wenig über die endgültigen Grenzen der Vorhersagbarkeit der zukünftigen Verhältnisse innerhalb des Klimasystems gesagt werden. Es sollte mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß zukünftige Trends im Ablauf des großräumigen Klimas der Erde nicht ohne weiteres detailliert genug und auf genügend große Zeiträume bezogen vorhersagbar sind, um das entsprechende Informationsbedürfnis der Gesellschaft zu befriedigen.

19. Soweit sich die Variabilität des Klimas aus Mechanismen innerhalb des Klimasystems ergibt, ist die Vorhersage von Klimaschwankungen wohl abhängig von der Entwicklung mathematischer Modelle des Klimasystems, die im Hinblick auf ihre geophysikalische Reichweite und Komplexität weit über die bisher entwickelten mathematischen Modelle hinausgehen. Es ist völlig unwahrscheinlich, daß alle physikalischen Faktoren, die in ihrer Gesamtheit die Klimaveränderungen bewirken, zum Zwecke der Klimavorhersage in einen geeigneten allgemeinen Bezugsrahmen gebracht werden können.

20. Und im gleichen Maß, wie sich Klimaschwankungen aus Veränderungen ergeben, die von außen her auf das Klimasystem einwirken, wie z. B. mögliche Schwankungen der Sonneneinstrahlung oder menschliche Einflüsse, ist das Gelingen einer Klimavorhersage auch von der Vorhersagbarkeit dieser Veränderungen selbst abhängig.

21. Bis es durch weitere Fortschritte in der Klimaforschung gelingt, die Klimavorhersage auf klaren physikalischen Zusammenhängen aufzubauen, muß die Beurteilung des künftigen Klimaverlaufs auf statistische Überlegungen gegründet werden, die einen relativ geringen Informationsgehalt aufweisen. Diese Überlegungen beschränken sich weitgehend auf die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Alternativmöglichkeiten, die entweder aufgrund vergangener Erfahrungen oder aufgrund von Daten über den zukünftigen Einfluß des Menschen möglich erscheinen.

22. Die Klimaformen der Vergangenheit zeigen, daß die zwischeneiszeitliche Erwärmung der letzten etwa 8000 Jahre schließlich in eine kältere, eiszeitlichere Klimaform übergehen wird. Der Beginn dieser Veränderung

kann noch viele Jahrtausende oder Jahrhunderte entfernt sein, es wäre aber auch vorstellbar, daß sie schon eingetreten ist. Es ist anzunehmen, daß dieser Übergang so allmählich erfolgt, daß er in den nächsten 100—200 Jahren inmitten der allgegenwärtigen Klimaschwankungen einen kaum merklichen Verlauf nähme. Es besteht aber die sehr geringe, jedoch abgrenzbare Wahrscheinlichkeit, daß innerhalb des selben Zeitraums eine viel schnellere Abkühlung des Klimas erfolgen wird.

23. Es muß anerkannt werden, daß diese Prognosen häufig sind, wenn — was nun als wahrscheinlich angesehen wird — die Zufuhr von Kohlendioxid in die Atmosphäre und sonstige Auswirkungen menschlicher Aktivitäten in den nächsten 200 Jahren zu einer allgemeinen Erwärmung der Erde führen. Dabei käme es vermutlich zu einer erheblichen Verringerung des Meereises an den Polen. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, daß sich damals, als das Meereis während des sogenannten „klimatischen Optimums“ vor etwa 5000 Jahren zurückging, die Klimazonen der unteren Breitengrade erheblich verschoben haben. Es wäre vorstellbar, daß die allgemeine Erwärmung schließlich zum völligen Verschwinden des arktischen Meereises führen könnte — einer als seit einer Million Jahren nie dagewesenen extremen Situation.

Auswirkungen von Klimaschwankungen auf die Umwelt und die Aktivitäten des Menschen

24. Die Biosphäre und viele menschliche Aktivitäten, wie z. B. Bodennutzung, Landwirtschaft und Energieverbrauch, sind abhängig von Wetter und Klima, wobei der Grad der Abhängigkeit in den verschiedenen Klimazonen der Erde unterschiedlich ist. Diese Abhängigkeit nimmt in vielen Teilen der Welt mit wachsendem Bevölkerungsdruck und steigenden Ansprüchen rasch an Bedeutung zu.

25. Die gegenwärtigen Ökosysteme und viele der komplexen, wechselseitig abhängigen Systeme, die in der Neuzeit vom Menschen geschaffen wurden, sind einigermaßen gut an die in der Vergangenheit vorherrschenden Klimaverhältnisse angepaßt. So zum Beispiel sind die gegenwärtig gebräuchlichen Systeme der Nahrungsmittel und Faserproduktion auf durchschnittliche Klimaverhältnisse begründet, und selbst eine geringfügige Veränderung des Klimas wäre mit schwerwiegenden sozialen und wirtschaftlichen Folgen verbunden. Eine Abkühlung der Erde um nur 1 °C könnte eine Verkürzung der Anbauzeiten bewirken und damit die Grenzen der Hauptweizenanbaugebiete verschieben und die Fischeausbeute und die Nutzholzgewinnung in mittleren und höheren Breitengraden herabsetzen, während eine solche Veränderung für die niederen Breitengrade von Vorteil sein könnte. Ebenso könnte eine Erhöhung der Gesamttemperatur zu einer Verbesserung der Verhältnisse in einigen Breiten und verringerten Erträgen in anderen Breiten führen.

26. Verschiedene Untersuchungen haben ebenfalls gezeigt, daß selbst dann, wenn keine Klimaveränderung stattfindet, diese Systeme erheblich beeinträchtigt werden können durch das Auftreten von Klimaschwankun-

gen, die über das in der Vergangenheit beobachtete Maß hinausgehen. Deshalb sollte bei der Planung zukünftiger wetterempfindlicher Aktivitäten ein angemessener Spielraum für Klimaveränderungen mit einkalkuliert werden.

27. Daten über die Klimaverhältnisse der Vergangenheit sind deshalb mit Vorsicht zu verwenden, und eine Methodologie für den richtigen Einsatz dieser Daten zur Ermittlung der möglichen Klimaschwankungen ist zu entwickeln.

28. Solange es nicht möglich ist, Klimaschwankungen und -trends vorherzusagen, müssen die bei der Planung menschlicher Aktivitäten wie Bodennutzung, Landwirtschaft und Energieverbrauch angewandten Methoden auf der Grundlage des Klimas der Vergangenheit und plausibler Annahmen aufgebaut werden. Der erste Schritt bei der Entwicklung der Planungsmethoden bestünde darin, die Empfindlichkeit einer bestimmten Tätigkeit gegenüber verschiedenen Klimaeinflüssen festzustellen, und zwar auf der Grundlage geeigneter Modelle, die auf den klimatischen Daten der Vergangenheit aufgebaut sind. Der nächste Schritt umfaßt die Verwendung der Modelle zur Ableitung von Schlußfolgerungen über den Einfluß der Klimaschwankungen. In die Modelle werden dann die zu erwartenden Schwankungen eingesetzt und für verschiedene Zeiträume berechnet. Es erschiene zum Beispiel sinnvoll, die Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion in verschiedenen Teilen der Welt zu bestimmen, und zwar ausgehend von plausiblen Annahmen im Hinblick auf die von Jahreszeit zu Jahreszeit und von Jahr zu Jahr auftretenden Schwankungen der wichtigsten klimatischen Parameter. Es sollte versucht werden, eine ähnliche Untersuchung auf einen längeren Zeitraum bezogen durchzuführen, wobei von plausiblen Trendbeurteilungen für wichtige klimatische Parameter auszugehen wäre, die einen Zeitraum von 1—3 Jahrzehnten erfassen.

29. Es muß betont werden, daß Kenntnisse über die Auswirkungen von Klimaschwankungen auf menschliche Tätigkeiten für den Prozeß der Entscheidungsfindung von wesentlicher Bedeutung sind. Die für diesen Zweck zu entwickelnden Methoden sollten es möglich machen, die Auswirkungen von Klimaveränderungen schließlich in Produktionszahlen, Kosten oder ähnlichen Größen auszudrücken, die von Wirtschaftlern, Planern und Politikern unmittelbar verwendet werden können.

Zukünftige Maßnahmen

30. Auf der Grundlage des gegenwärtigen Wissensstandes kann gesagt werden, daß die **Überwachung** der natürlichen und anthropogenen Prozesse, die zu Klimaschwankungen führen, von größter Bedeutung ist, insbesondere für die Früherkennung eventueller Gefahren. Solche Überwachungsmaßnahmen werden nun im Rahmen des GEMS-Programms ausgearbeitet. Unter anderem sind folgende Parameter zu überwachen:

- (a) Kohlendioxid
- (b) Art der Aerosolpartikel vulkanischen Ursprungs in der Stratosphäre und ihr Durchlässigkeitsgrad, insbesondere in den Polarzonen

- (c) Menge der Spurengase (z. B. Stickstoffoxide, Schwefeldioxid, Chlorfluorkohlenwasserstoffe und Aerosole in der unteren Troposphäre
- (d) Ausdehnung und Albedo von Schnee und Eis auf der Erdoberfläche
- (e) Veränderungen der Oberflächenalbedo von Landflächen und Meeren, insbesondere im Hinblick auf verschiedene Arten der Bodennutzung, Vegetationsveränderungen, Verschmutzung und biologische Produktivität der Meere.

Besonderer Nachdruck ist auf die Notwendigkeit zu legen, eventuelle geringfügigere Veränderungen der extraterrestrischen Sonneneinstrahlung, vor allen Dingen im sichtbaren Bereich und in der Nähe des ultravioletten Bereichs zu überwachen.

31. Besser erforscht werden müssen insbesondere auch die Wechselwirkungen innerhalb des Klimasystems (wie z. B. die Wechselwirkungen zwischen Strahlung, Wolken und Aerosolen; zwischen Meereis, Meer und Atmosphäre; zwischen Temperaturanomalien an der Meeresoberfläche, latenten und spürbaren Wärmeströmungen und Luft- und Meeresströmungen und dem Austausch von Kohlendioxid zwischen der Atmosphäre, den Meeren und der Biosphäre, um geeignete Techniken zur Parametrisierung in numerischen Modellen zu entwickeln.

32. Die Entwicklung von umfassenden, dreidimensionalen, zeitabhängigen, rückgekoppelten Modellen der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Meer und Eis als Grundlage für Klimavorhersagen sollte besonderen Vorrang erhalten. Weniger komplexe Modelle, die die Bewegungen in der Atmosphäre und/bzw. in den Ozeanen durch Parametrisierungen vereinfachen, sind ebenfalls wichtig, insbesondere zur Prüfung der möglichen Auswirkungen anthropogener Prozesse.

33. Forschungsarbeiten sind außerdem erforderlich im Hinblick auf eine bessere Anpassung der menschlichen Aktivitäten an klimatische Veränderungen und Schwankungen. Dies gilt insbesondere auch im Hinblick auf die Notwendigkeit einer steigenden landwirtschaftlichen Produktion und im Hinblick auf die Auswirkungen des Energieverbrauchs auf die örtlichen, regionalen und globalen Klimaverhältnisse.

34. Als Grundlage für die Prüfung der Aussagekraft numerischer Klimamodelle sowie für die statistisch-synoptische Forschung sind mehr quantifizierbare „näherungsweise ermittelte“ Daten erforderlich, um den Klimaablauf vor Beginn seiner Beobachtung und Aufzeichnung mit Hilfe von Meßinstrumenten zu erhellen. Dazu gehören **Daten** auf der Grundlage von Jahresringen an Bäumen, in Torf enthaltenem Pollen oder Sedimentproben von Seeböden sowie Proben der jährlich abgelagerten Eis- und Sedimentschichten, Wettertagebücher, Getreidepreise etc. Die vorhandenen Meßreihen sollten ausgewertet, auf ihre Homogenität hin überprüft und in Datenbanken gesammelt werden. Vorrangig behandelt werden sollten die Beobachtungen, die vor der Gründung von Wetterdiensten gemacht wurden. Dabei sollten nicht nur die Temperaturen, sondern auch die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Windrichtungen sowie Niederschlagsmenge und -häufigkeit (vorzugsweise gemittelt) für klimatisch homogene Gebiete in einer Größenordnung von 10^4 — 10^5 km² berücksichtigt werden. Vorrangig behandelt werden sollte auch die Sammlung von Zeitreihen meeresmeteorologischer und ozeanographischer Daten in Gebieten, die nicht größer als 10^5 km² sind, zusammen mit Angaben über das Meereis und Angaben über das Zufrieren und Auftauen von Flüssen und Seen.

Aus dem Deutschen Wetterdienst

25 Jahre Deutscher Wetterdienst

Nachdem seit 1946 die westdeutsche Wirtschaft und Öffentlichkeit 6 Jahre lang von mehreren Zonen- und Landeswetterdiensten mit meteorologischer Information versorgt wurde, ergriff die Bundesregierung die Gesetzgebungsinitiative und ermöglichte mit einem *Gesetz über den Deutschen Wetterdienst* das am 11. 11. 52 unterzeichnet wurde und am 29. 11. desselben Jahres in Kraft trat, die Schaffung eines einheitlichen Wetterdienstes in der Bundesrepublik Deutschland.

Das Gesetz schreibt vor, daß die meteorologische Sicherung der Luft- und Seefahrt, die Versorgung des Verkehrs, der Land- und Forstwirtschaft, der gewerblichen Wirtschaft, des Bau- und

des Gesundheitswesens mit meteorologischen Informationen zu gewährleisten sei. Immerhin konnte sich der DWD auf die bestehenden wetterdienstlichen Einrichtungen abstützen. Es gab zur Beschaffung des Grundlagenmaterials 91 synoptische Beobachtungsstationen, 490 Klimastationen, 3130 phänologische Stationen und ein Netz von fast 3000 Niederschlagsmeßstellen. 1647 Bedienstete waren damals in der Zentralstelle, bei 11 Wetterämtern, 9 Flugwetterwarten, 9 Agrarmeteorologischen Forschungs- und Versuchsstellen, 5 Meteorologischen Observatorien und 8 Medizin-Meteorologischen Forschungsstellen beschäftigt. Seitdem hat die Rationalisierung und

ein steter Trend zur Zentralisierung zwar das Grundschema der Organisation nicht geändert, beides hat jedoch zu einer Verminderung der Anzahl der Dienststellen und zur Verlagerung von Aufgaben geführt. Während bis 1973 die Zahl der Bediensteten auf 2200 anstieg — sie ist seitdem wieder rückläufig —, reduzierten sich die Beobachtungsnetze um 10 bis 15%. Ein Wetteramt, Berlin, kam hinzu, zwei Flugwetterwarten, Saarbrücken und Berlin-Tegel, wurden neu eingerichtet. Die Zahl der Agrarmeteorologischen Forschungs- und Versuchsstellen jedoch verminderte sich auf 4, es gibt nur noch 2 Meteorologische Observatorien und die Medizin-Meteorologischen Forschungsstellen wurden, nach mehreren Zwischenstufen, 1977 zu einer Zentrale zusammengefaßt.

Gebietsmäßig erweiterte sich der Zuständigkeitsbereich des DWD 1955 um das Saarland. Auch der Aufgabenkatalog wurde durch ein Ergänzungsgesetz

erweitert, als der zunehmende Gehalt der Atmosphäre an radioaktiven Substanzen 1959 deren Überwachung notwendig machte.

Die Hauptlast der Wetterberatungs- und Gutachtertätigkeit lag und liegt bei den Wetterämtern und Flugwetterwarten. Diese mit dem notwendigen Grundlagenmaterial zu versorgen, ist die Hauptaufgabe des Zentralamtes in Offenbach. Hier änderte sich seit 1952 die Arbeitsweise entscheidend, sowohl bei der Sammlung der für eine Beratungs- und Vorhersagetätigkeit notwendigen Daten und ihrer Weitergabe als auch bei der Bearbeitung dieser Daten und der Verbreitung der Arbeitsergebnisse.

Jegliche Vorhersage hat zur Voraussetzung, daß der Ausgangszustand möglichst genau bekannt ist. Zu diesem Zwecke wurde ein weltweites System der Dateneinsammlung und des Austausches synoptischer Daten organisiert. In diesem übte der DWD bereits 1954 eine zentrale Funktion für den europäischen Bereich aus. Hinzu kamen 1960 die Aufgaben einer europäischen Zentrale für den Austausch von Wettermeldungen für die Luftfahrt. Gleichzeitig wurde Offenbach eine der fünf Zentralen für die Übermittlung von Wetterinformationen auf der Nordhalbkugel. Der zunehmende Umfang des Datenstromes führte ab 1967 zur schrittweisen Einführung schneller Datenleitungen. Parallel zu dieser Entwicklung gingen die Bemühungen, die manuelle Vermittlung von Wetterinformationen zu automatisieren. Schließlich konnte 1973 die Automatische Fernmeldespeichervermittlung (AFSV) in Betrieb genommen werden, die ein Eingreifen des Menschen bei der Weitergabe von Wetterinformationen fast völlig überflüssig macht und deren Kapazität bereits zweimal erweitert werden mußte.

Eine wertvolle Hilfe für die Arbeit des Meteorologen sind die Satellitenbilder. Seit 1966 besitzt der DWD eine eigene Empfangsanlage, mit der regelmäßig von den amerikanischen Wettersatelliten Wolkenbilder in verschiedenen Spektralbereichen empfangen werden können. Die weitere Vervollkommnung der Einrichtungen ermöglichte seit 1968 auch eine Weiterleitung der Bilder an eine Reihe von Wetterämtern und Flugwetterwarten.

Die vom Fernmeldedienst bereitgestellten Beobachtungsdaten wurden in der Analysenzentrale nach synoptischen Methoden zu Analysen und Vorhersagekarten weiterverarbeitet, und in einer gewissen Auswahl über

Fernschreiber an die Wetterämter und Flughäfen übermittelt. Umwälzend wirkte sich auf die Arbeitsweise der Analysenzentrale und der Außenstellen die Einführung des Faksimile-Übertragungsverfahrens im Jahre 1955 aus. Damit konnte auf eine zentrale Erstellung und Verbreitung einer großen Zahl von Unterlagen umgestellt und viel Doppelarbeit abgeschafft werden. Inzwischen kündigte sich auch für die Bearbeitungsweise der Beobachtungs- und Meßdaten eine neue Entwicklung an: Hochleistungsrechenanlagen eröffneten die Möglichkeit, mit mathematisch-physikalischen Methoden an die Wettervorhersage heranzugehen. 1958 wurden vom DWD die ersten Versuche hierzu unternommen, und es stellte sich bald heraus, daß die Anschaffung eines eigenen Computers lohnend sein würde. In den Jahren 1965/66 installierte man dann auch 2 Maschinen der zweiten Computergeneration im Zentralamt des DWD. Von einfachen atmosphärischen Modellen ausgehend wurden Wind- und Temperaturvorhersagen zunächst für einen 30-Stunden-Vorhersagezeitraum errechnet. Mit der Verbesserung der Modelle konnte der Vorhersagezeitraum bis auf 96 Stunden ausgedehnt werden. 1976 wurde dann ein neuer Computer mit der 20fachen Rechengeschwindigkeit angeschafft, der verbesserte Modellrechnungen erlaubt.

Doch nicht nur Vorhersagekarten, auch Eintragungskarten und Analysen konnten nach der Beschaffung von automatischen Zeichengeräten 1966 mittels Rechenanlage angefertigt und der Analysenzentrale zur Verfügung gestellt werden. Seit 1955 hat sich die Anzahl der über Faksimile verbreiteten Produkte versechsfacht, wovon heute etwa noch ein Viertel manuell erstellt und drei Viertel vom Computer angefertigt werden. Ein großer Teil der Computerprodukte bedarf allerdings noch der Überarbeitung von Hand.

Auch die internationale Arbeitsteilung wirkte sich auf die Entwicklung des DWD aus. So bekam Frankfurt Mitte der 60er Jahre als eine der 5 europäischen Flugwettervorhersagezentralen die Aufgabe, für die internationale Luftfahrt Vorhersagekarten für den Europa-Mittelmeerraum und die Flugroute nach Indien zu erarbeiten und in Europa zu verbreiten. 1967 wurde Offenbach dann eine der Regionalen Meteorologischen Zentralen, deren Arbeitsergebnisse von 18 europäischen Wetterdiensten verwertet werden.

Die Arbeit des DWD beschränkt sich jedoch nicht auf Wetterauskünfte und

-vorhersagen. Ein großer Teil des Arbeitspotentials wird auf klimatologische und agrarmeteorologische Aufgaben verwandt.

In der Klimatologie dominierten während der 50er und 60er Jahre noch methodische Grundlagenforschungen, die Bearbeitung von Klimareihen, Klimakarten und Klimaatlanten. Zu Beginn der 70er Jahre vollzog sich dann die entscheidende Umstellung auf anwendungsbezogene Arbeitsverfahren, was sich in der Erarbeitung von Gutachten für viele Zweige der Wirtschaft und die verschiedensten Bereiche der Öffentlichkeit ausdrückte. Die Technische Klimatologie, die sich mit der Auswirkung des Klimas auf viele zivilisatorische Einrichtungen befaßt, gewann zunehmend an Gewicht. Auch bei der Landesplanung, bei der Bebauung von Ballungsgebieten, bei der Standortwahl von industriellen Großbetrieben werden unter dem Aspekt des Umweltschutzes seit einem Jahrzehnt zunehmend Klimafaktoren berücksichtigt. Zur Bewältigung dieser Aufgaben ist die Elektronische Datenverarbeitung ein unentbehrliches Hilfsmittel, das mittlerweile in fast allen Bereichen der Klimatologie eingesetzt wird, angefangen mit der Erfassung der Klimadaten über deren Prüfung bis zu ihrer statistischen Auswertung.

Während noch vor 25 Jahren das Hauptanliegen der Landwirtschaft die Erhöhung der Mengenerträge war, liegt jetzt das Schwergewicht bei der Qualitätssteigerung und Ertragssicherung. Die agrarmeteorologischen Arbeiten hierfür stützen sich seit jeher auf experimentelle Forschungen und Beobachtungen ab, deren Ergebnisse dann in die Beratung der Landwirtschaft einfließen. Doch auch hier ist seit einem Jahrzehnt ein Trend zur theoretischen Behandlungsweise agrarmeteorologischer Probleme festzustellen, der sich in der zunehmenden Verlagerung auf Modellrechnungen niederschlägt. Auf diese Weise wurde es möglich, die komplexe Wirkung meteorologischer Parameter auf die Kulturpflanzen zu beurteilen und der Beratung zugrunde zu legen.

25 Jahre lang ist es dem DWD gelungen, den vielseitigen Anforderungen gerecht zu werden; man kann zuversichtlich sein, daß durch weitere Automatisierung und Rationalisierung trotz finanzieller und personeller Engpässe eine ausreichende Versorgung der Allgemeinheit mit meteorologischen Informationen gewährleistet bleibt.

W. HORST, Offenbach

Das interessante Satellitenbild



Erstes METEOSAT-Bild mit voller Auflösung (9. 12. 1977)

Mit METEOSAT wurde am 23. November 1977 um 02.25 MEZ von Cape Canaveral der erste europäische geostationäre Wettersatellit gestartet. METEOSAT ist das Ergebnis einer mehrjährigen erfolgreichen Zusammenarbeit von acht europäischen Ländern, die im September 1972 in einem Abkommen mit der damaligen European Space Research Organization (ESRO) — der heutigen European Space Agency (ESA) —

die Verwirklichung dieses ehrgeizigen Projekts beschlossen. Die Bundesrepublik Deutschland trug mit 26% die Hauptlast der Kosten von 600 Mio DM. Der Start am 23. November 1977 verlief problemlos — ein sogenannter „Bilderbuch“-Start. Die Trennung des Satelliten von der 3. Stufe der Thor-Delta-Rakete erfolgte 25 Minuten nach dem Abheben von der Startrampe. METEOSAT verblieb zunächst in einem

elliptischen Transferorbit und wurde am gleichen Tag um 1917 MEZ durch Zünden des Apogäumsmotors in eine geostationäre Umlaufbahn gebracht. Er befand sich am 24. November 1977 bei etwa 80°W und driftete mit 6°/Tag westwärts. Man entschied sich, ihn über dem östlichen Pazifik abzustoppen und in östlicher Richtung auf seine endgültige Position bei 0° Länge zurücktreiben zu lassen. 0° Länge wurde am

7. Dez. 1977 erreicht. Während dieser Driftphase wurden ab 29. November 1977 mit dem Austesten der einzelnen Untersysteme begonnen, nachdem METEOSAT am 28. November 1977 in den Empfangsbereich der Antennenanlage bei Michelstadt/Odenwald gelangt war, und die Satellitenkontrolle von der METEOSAT-Betriebsabteilung in Darmstadt übernommen werden konnte.

Das erste Bild aus dem sichtbaren Bereich des Spektrums, allerdings mit geringer Auflösung (5 km) wurde am

6. Dez. 1977 beim Testen des Radiometers gewonnen. Auf der Seite 28 ist das *erste Bild*, das die Erdscheibe mit voller Auflösung (2,5 km im Bildmittelpunkt) zeigt, wiedergegeben. Es wurde am 9. Dezember 1977 am 1345 MEZ empfangen.

Die Inbetriebnahme der Bodeneinrichtungen, besonders des Meteorologischen Verarbeitungszentrums (MIEC) in Darmstadt wird in den nächsten Wochen stufenweise erfolgen. Mit einem vollständigen Programm, dazu gehören die Ableitungen von

- Winddaten
- Höhe der Wolkenobergrenzen
- Meeresflächentemperaturen
- Bedeckungsgrad und Art der Wolken
- Wasserdampfverteilung in der oberen Troposphäre
- Daten der Strahlungsbilanz

kann erst nach Ablauf eines halben Jahres gerechnet werden. Das Sendeprogramm zur Wiederverbreitung der Bilddaten wird ebenfalls stufenweise ausgebaut, so daß Bilder in halbstündlicher Folge erst ab März 1978 den Nutzern zur Verfügung stehen werden.

T. MOHR, Offenbach

Aus der Arbeit des Geophysikalischen Beratungsdienstes der Bundeswehr

Die Nachtsichtvorhersage

Bei der zunehmenden Bedeutung, die den Nachtübungen bei der Bundeswehr beigemessen wird, ist dem Geophysikalischen Beratungsdienst der Bundeswehr (GeophysBDw) eine neue Aufgabe zugefallen, nämlich die Vorhersage des Helligkeitsverlaufes in einer bestimmten Nacht. Diese Nachtsichtvorhersage soll die Berater des GeophysBDw und die Truppe mit Unterlagen versorgen, aus denen Schlüsse zu ziehen sind über Orientierungs- und Bewegungsmöglichkeiten im Gelände sowie über Erkennungsmöglichkeiten von ruhenden oder bewegten Objekten während der Dunkelheit.

Welcher Art sind diese Unterlagen, die seit 2 Jahren vom Amt für Wehrgeophysik zur Verfügung gestellt werden? Die Abschätzung der Nachthelligkeit ist nicht nur ein astronomisches, sondern auch ein meteorologisches Problem; denn die in erster Linie durch den Mond hervorgerufene nächtliche Beleuchtungsstärke wird durch verschiedene Wetterbedingungen teils begünstigt — z.B. durch Wolkenarmut oder durch eine Schneedecke —, teils verschlechtert — z.B. durch dichte Bewölkung, Niederschlag oder Nebel.

Es werden daher maschinell für je ein Jahr im voraus folgende Nachschlagwerke herausgegeben: *)

1. Die „Betriebsunterlage für den GeophysBDw Nr. 5: Astronomische Tabellen und Tafeln“ liefert

*) s. Studie des AWGeophys Nr. 75114 „Mittlere Häufigkeit heller und dunkler Mächte in der Bundesrepublik Deutschland“ von BAUTZMANN, WEISS, ALLNOCH.

für jeden Tag des kommenden Jahres die einschlägigen astronomischen Daten von Sonne und Mond, und zwar in Tabellenform:

- Auf- und Untergangszeiten der Sonne mit Dämmerungsangaben von 70° N bis 65° S für jeden Monat für die Länge 10° E
- Auf- und Untergangszeiten des Mondes von 70° N bis 65° S für jeden Monat für die Länge 10° E.

An graphischen Darstellungen werden gebracht:

- Sonnenhöhen und Sonnenazimute für ausgewählte geographische Breiten auf dem Längengrad 10° E
- Mondhöhen für jede Lunation für 3 Gitterpunkte, nämlich 40° N 10° E und 50° N 10° E sowie 60° N 10° E
- Mondazimute für jede Lunation für dieselben 3 Gitterpunkte wie für die Mondhöhen.

Ein Ablesebeispiel möge den hohen Informationsgehalt dieser graphischen Darstellung zeigen.

Verfolgen wir anhand der Abb. 1 einmal den Verlauf der Nacht vom 01. zum 02. Dezember 1977 am Gitterpunkt 50° N, 10° E, also in der Nähe von Würzburg.*

Man liest ab in MEZ:

Sonnenuntergang um	1622
Ende der bürgerlichen Dämmerung	1659

*) Auf Abbildung der Mondazimute wurde verzichtet

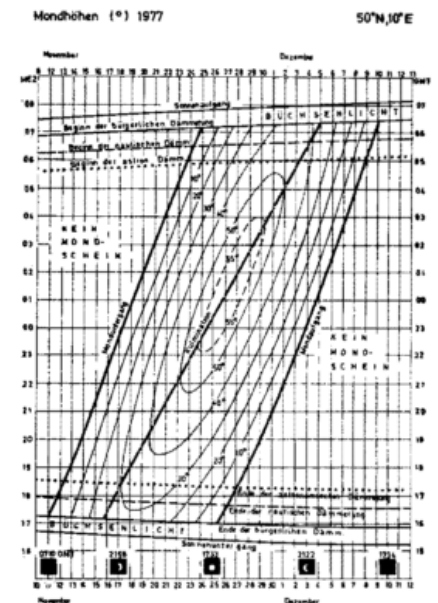


Abb. 1

Ende der nautischen Dämmerung	1740
Ende der astronomischen Dämmerung (bzw. Beginn d. dunklen Nacht)	1817
Mondaufgang	2151
Mondhöhe 10°	
Mondazimut 85°	2300
Mondhöhe 20°	
Mondazimut 96°	0005
Mondhöhe 30°	
Mondazimut 111°	0115
Mondhöhe 40°	
Mondazimut 132°	0240
Mondkulmination	
Mondazimut 180°	0500
Beginn der astronomischen Dämmerung (bzw. Ende der dunklen Nacht)	0600

Beginn der astronomischen Dämmerung	0600
(bzw. Ende der dunklen Nacht)	
Beginn der nautischen Dämmerung	0640
Beginn der bürgerlichen Dämmerung	0721
Sonnenaufgang um	0758

2. Wer die Tabellenform der graphischen Darstellung vorzieht, kann zu dem „Astronomischen Kalender“ greifen; er gibt für 5 Gitterpunkte in der Bundesrepublik Deutschland die stündlichen Mondpositionen für jede Nacht des kommenden Jahres an. Hier werden unter besonderer Berücksichtigung der Heeresbelange die Mondazimute in Strich angegeben.

3. Der Truppenführer hat zwar recht ausführliche Angaben über die Mondpositionen während einer Nacht; über den Verlauf der Nachthelligkeit kann er sich jedoch aus Mondhöhe und Mondphase nur ungefähre Vorstellungen machen, da hier nun der Einfluß des Wetterablaufs zum Tragen kommt. Diese Lücke hat der GeophysBDBw durch die Herausgabe der Tabellen „Nächtliche Globalbeleuchtungsstärken“ geschlossen. Sie geben für dieselben 5 Gitterpunkte wie der Astronomische Kalender die stündlichen Nachthelligkeiten in Lux für jede Nacht des kommenden Jahres in Abhängigkeit von Mondphase, Mondhöhe und Bewölkung, aufgeschlüsselt für „heiteren“ (nur bis 2/8 Bewölkung), „halb bedeckten“ (3/8 - 6/8 Bewölkung) und „bedeckten“ (über 6/8 Bewölkung) Himmel. Die Globalbeleuchtungsstärke setzt sich zusammen aus zwei Anteilen: der direkten Strahlung eines Himmelskörpers wie Sonne oder Mond und der (indirekten) diffusen Himmelsstrahlung, die von der Streuung der direkten Strahlung an den Luftmolekülen und Luftbeimengungen (Aerosol) sowie an den Wolkenelementen (Tröpfchen oder Schnee- bzw. Eiskristallen) herührt.

Die Globalbeleuchtungsstärke wird bezogen auf die Flächeneinheit einer waagerechten, freien (horizontalen) Fläche. Als Maßeinheit dient das Lux (Normal-Lux); die z.T. sehr kleinen Werte der nächtlichen Globalbeleuchtungsstärke werden vorzugsweise in Millilux (mlx) gegeben.

Die für das Heer durchgeführten Berechnungen der nächtlichen Globalbeleuchtungsstärke basieren auf den Messungen der Globalbeleuchtungsstärke von Sonne und Mond, die von BULLRICH (Meteorologisches Institut d. Universität Mainz) durchgeführt und in den Berichten des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone Nr. 4 veröffentlicht worden sind. Spätere Kontrollmessungen von FEUSSNER (Meteorologisches Institut d. FU Berlin) ergaben, daß diese ersten Messungen für den Mondanteil etwas überhöhte Werte geliefert hatten; es wurde ein Reduktionsfaktor von 0,45 empfohlen. Außerdem sind sämtliche Bullrichsche Helligkeitstabellen in Hefner-Lux gegeben, so daß noch der Umrechnungsfaktor von Hefner-Lux in Normal-Lux berücksichtigt werden mußte (1 Hefner-Lux = 0,903 Normal-Lux). Die mit diesen Faktoren reduzierten Bullrichschen Tabellen liegen den im Amt für Wehrgeophysik durchgeführten maschinellen Berechnungen der Globalbeleuchtungsstärke zugrunde.

Die bereits erwähnten — alljährlich herauskommenden — Tabellen für die nächtliche Globalbeleuchtungsstärke enthalten — für bestimmte Koordinatenschnittpunkte — nicht nur den Gesamtbetrag der Globalbeleuchtungsstärke, sondern auch noch die Aufschlüsselung in den Mondanteil und den Sonnenanteil (von Sonnenuntergang bis zur Sonnenhöhe von -16° bzw. von -16° Sonnenhöhe bis zum Sonnenaufgang). Die Summe dieser beiden Anteile ist etwas kleiner als der Gesamtbetrag der nächtlichen Globalbeleuchtungsstärke; die Differenz zwischen beiden ist das jeweilige Restlicht des mondlosen Nachthimmels, das nachts auch ohne Einfluß von Sonne und Mond vorhanden ist; es kann angesetzt werden: bei „heiter“ mit 0,0016 lx bzw. 1.6 mlx, bei „halb bedeckt“ mit 0,0008 lx bzw. 0.8 mlx und bei „bedeckt“ mit 0,0005 lx bzw. 0.5 mlx.

Nicht berücksichtigt sind jedoch die Streulichtanteile von Siedlungen, Städten, Verkehrsanlagen usw. sowie Anteile aufgrund unterschiedlicher Reflexionseigenschaften der Erdoberfläche. Ihre zeitlich und räumlich stark wechselnden Beiträge zur Gesamtbeleuchtung einer Fläche können nur von Fall zu Fall abgeschätzt werden.

Die in den Tabellen angegebenen Werte der nächtlichen Globalbeleuchtungsstärke sind Mittelwerte, die je nach Mondhöhe der einzelnen Nachtstunden und nach Mondphase der einzelnen Nacht den Bullrichschen Tabellen entnommen wurden, und zwar für drei verschiedene meteorologische Bewölkungsverhältnisse; wie bereits erwähnt, wurde unterteilt in „heiter“, „halbbedeckt“ und „bedeckt“. Damit kann der Verlauf der Nachthelligkeit von Stunde zu Stunde je nach dem vom Synoptiker vorhergesagten Bewölkungsgrad angegeben werden.

Als Beispiel wählen wir dieselbe Nacht, die wir schon für die Mondposition gewählt haben, nämlich 1./2. Dezember 1977, für heiteren Himmel (Tab. 1).

NACHT VOM	1./2.	2./3.	3./4.
16 MEZ	MND	MND	MND
*	S VOR SU	S VOR SU	S VOR SU
*	G	G	G
17 MEZ	MND 0.0000	MND 0.0000	MND 0.0000
*	S 1.1515	S 1.0129	S 0.9608
*	G 1.1531	G 1.0775	G 1.0145
18 MEZ	MND 0.0000	MND 0.0000	MND 0.0000
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0017	G 0.0016	G 0.0016
19 MEZ	MND 0.0000	MND 0.0000	MND 0.0000
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0016	G 0.0016	G 0.0016
20 MEZ	MND 0.0000	MND 0.0000	MND 0.0000
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0016	G 0.0016	G 0.0016
21 MEZ	MND 0.0000	MND 0.0000	MND 0.0000
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0016	G 0.0016	G 0.0016
22 MEZ	MND 0.0001	MND 0.0000	MND 0.0000
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0017	G 0.0016	G 0.0016
23 MEZ	MND 0.0034	MND 0.0001	MND 0.0000
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0050	G 0.0017	G 0.0016
24 MEZ	MND 0.0089	MND 0.0021	MND 0.0000
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0105	G 0.0037	G 0.0016
1 MEZ	MND 0.0147	MND 0.0057	MND 0.0011
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0163	G 0.0073	G 0.0027
2 MEZ	MND 0.0206	MND 0.0094	MND 0.0033
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0222	G 0.0110	G 0.0049
3 MEZ	MND 0.0263	MND 0.0130	MND 0.0054
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0279	G 0.0146	G 0.0070
4 MEZ	MND 0.0301	MND 0.0162	MND 0.0074
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0317	G 0.0178	G 0.0090
5 MEZ	MND 0.0312	MND 0.0181	MND 0.0090
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0328	G 0.0197	G 0.0106
6 MEZ	MND 0.0292	MND 0.0182	MND 0.0099
*	S 0.0000	S 0.0000	S 0.0000
*	G 0.0308	G 0.0198	G 0.0115
7 MEZ	MND 0.0246	MND 0.0165	MND 0.0097
*	S 0.0684	S 0.0581	S 0.0497
*	G 0.0946	G 0.0762	G 0.0610
8 MEZ	MND	MND	MND
*	S NACH SA	S NACH SA	S 272.3539
*	G	G	G 272.3640

LUX-WERTE	SU, SA	EBD, ABO	ENO, AND	MA, MU (VOLLM.)
HEITER	277	1.4	0.0059	0.0006
HALBBEDECKT	221	1.4	0.0051	0.0005
BEDECKT	33	0.15	0.0014	0.0003

Tab. 1 Nächtliche Globalbeleuchtungsstärke in Lux durch Mond und Sonne sowie Gesamtwert-Restlicht (0,0016 Lux) Dezember 1977 50.00 N, 10.00 E (Hammelburg) HEITER

Wir erinnern uns: Um 1622 MEZ geht die Sonne unter; aber bis zu einer Depression von -16° trägt sie noch zur nächtlichen Globalbeleuchtungsstärke bei, wobei natürlich der Westhorizont besonders aufgehellt wird. Wir erinnern uns weiter, daß der Mond erst um 2151 MEZ aufgeht. Daher lesen wir um 1700 MEZ nur einen Beitrag von der Sonne mit 1151,5 mlx ab, zu dem noch das Restlicht des mondlosen Nachthimmels addiert werden muß; es wurde für heiteren Himmel mit 1,6 mlx angesetzt, so daß sich für 1700 MEZ ein Gesamtwert der nächtlichen Globalbeleuchtungsstärke von 1153,1 mlx ergibt. Ab 1950 MEZ leistet die Sonne keinen Beitrag mehr, und vor 2151 MEZ leistet der Mond noch keinen Beitrag; die Globalbeleuchtungsstärke besteht nur aus dem Restlicht von 1,6 mlx.

Ab 2200 MEZ leistet der Mond einen bis zu seiner Kulmination um 0500 MEZ ständig zunehmenden Beitrag; das Maximum des Mondanteils plus Restlicht beträgt um 0500 MEZ 32,8 mlx. Danach nimmt der Mondanteil ab; hinzu kommt jedoch ab 0700 MEZ der Anteil der noch unter dem Horizont stehenden Sonne; denn — wie erinnerlich — geht die Sonne erst um 0758 MEZ auf, was zu einem Gesamtwert der nächtlichen Globalbeleuchtungsstärke von 94,6 mlx um 0700 MEZ führt.

Die Verknüpfung dieser stündlichen Lux-Werte der nächtlichen Globalbeleuchtungsstärke mit den Orientierungsmöglichkeiten im Gelände kann nur durch praktische Vergleiche bei Nachtübungen erhalten werden. Aufgrund dieser Verknüpfung kann dann der Helligkeitsverlauf einer Nacht je nach den Bewölkungsverhältnissen festgestellt werden, und zwar in den Denkkategorien des Truppenführers:

Es werden 6 nächtliche Helligkeitsstufen unterschieden:

Helligkeitsstufe	mlx
sehr hell	135-306
hell	40-135
mäßig hell	5-40
mäßig dunkel	2-5
dunkel	1-2
sehr dunkel	< 1

Jeder dieser Helligkeitsstufen werden nach den praktischen Erprobungen bestimmte Einschränkungen der Orientierungs- und Bewegungsmöglichkeiten im Gelände zugeordnet. Danach ergibt sich für die Nacht vom 1./2. Dezember 1977 bei heiterem Himmel der in Tab. 2 dargestellte Helligkeitsverlauf.

Es zeigt sich eindrucksvoll die Veränderlichkeit der nächtlichen Globalbeleuchtungsstärke im Verlauf einer Nacht. Die Helligkeitsveränderung braucht keineswegs immer graduell vor sich zu gehen, sondern kann durchaus von einer Stunde zur anderen mehrere Helligkeitsstufen überspringen, wie z.B. von 1700 MEZ auf 1800 MEZ der rasche Abfall von „sehr hell“ auf „dunkel“ beweist.

INGRID WEISS, Traben-Trarbach

MEZ	mlx	Helligkeitsstufen	mlx	Orientierungsmöglichkeiten	Bewegungsmöglichkeiten
17	1153,1	sehr hell	135-306	befriedigend	Auf Straßen und im Gelände fast wie tagsüber
18	1,7	dunkel	1- 2	stark erschwert	Auf Straßen mit Bäumen, im Gelände mit Einweiser
19	1,6				
20	1,6				
21	1,6				
22	1,7				
23	5,0	mäßig hell	5- 40	erschwert	Auf Straßen und im Gelände mit wesentlich verminderter Geschwindigkeit
00	10,5				
01	16,3				
02	22,2				
03	27,9				
04	31,7	hell	40-135	noch ausreichend	Auf Straßen und im Gelände mit verminderter Geschwindigkeit
05	32,8				
06	40,8				
07	94,6				

Tab. 2
Helligkeitsverlauf der Nacht 1./2. Dez. 1977 bei heiterem Himmel (50° N, 10° E)

Wichtige Neuerscheinungen

BREUER, G.

Wetter nach Wunsch? Perspektiven und Gefahren der künstlichen Wetterbeeinflussung.
Stuttgart: Deutsche Verlags-Anst. 1976. 180 S.

FAUST, V. u. a.

Biometeorologie. Der Einfluß von Wetter und Klima auf Gesunde und Kranke. 2. Aufl.
Stuttgart: Hippokrates 1977. 359 S., 5 Faltkt.

FRITTS, H. C.

Tree rings and climate.
London: Academic Press 1976. XIII, 567 S.

HEICKLEN, J.

Atmospheric chemistry.
New York u. a.: Academic Press 1976. XIV, 406 S.

GRIFFITHS, J. F.

Climate and the environment.
Boulder/Co: Westview Press 1976. VII, 148 S. = Westview environmental studies. 2.

- HINKLEY, E. D. (Ed.)
Laser monitoring of the atmosphere.
Berlin: Springer 1976. XV, 380 S. =
Topics in Applied Physics. 14.
- McCARTNEY, Earl J.
Optics of the atmosphere. Scattering
by molecules and particles.
New York: John Wiley and Sons
1976. XVII, 408 S. = Wiley Series in
Pure and Applied Optics.
- PAGNEY, P.
Les climats de la terre.
Paris: Masson 1976. 151 S. = Initia-
tion aux études de géographie.
- PALTRIDGE, G. W.; PLATT, C. M.
Radiative processes in meteorology
and climatology.
Amsterdam u. a.: Elsevier 1976. XVII,
318 S. = Developments in Atmo-
spheric Science. 5.
- SCHWERDTFEGGER, P.
Physical principles of micro-meteo-
rological measurements.
Amsterdam u. a.: Elsevier 1976. IX,
113 S. = Developments in Atmo-
spheric Science. 6.
- SULMAN, F. G.
Health, weather and climate.
Basel: S. Karger 1976. VII, 166 S. =
Perspectives in Medicine. 7.
- HOUGHTON, J. Th.
The physics of atmospheres.
Cambridge u. a.: Cambridge Univ.
Press 1977. XIII, 203 S.
- LAMB, H. H.
Climate. Present, past and future.
Vol. 2: Climatic history and the fu-
ture.
London: Methuen & Co. Ltd. 1977.
835 S.
- NIEUWOLT, S.
Tropical climatology. An introduc-
tion to the climates of the low lati-
tudes.
London: Wiley 1977. IX, 207 S.
- PERRY, A. H.; WALKER, J. M.
The ocean-atmosphere system.
London, New York: Longman 1977.
XI, 160 S.
- TWOMEY, S.
Atmospheric aerosols.
Amsterdam: Elsevier 1977. XIV, 302
S. = Developments in Atmospheric
Science. 7.
- WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V.
Atmospheric science. An introduc-
tory survey.
New York/NY: Academic Press 1977.
XVII, 467 S.
- WALLEN, C. Ch. (Ed.)
Climates of central and southern
Europe.
Amsterdam u. a.: Elsevier 1977. IX,
248 S. = World Survey of Climato-
logy. 6.
- WEISCHET, W.
Einführung in die Allgemeine Kli-
matologie. Physikalische und meteo-
rologische Grundlagen.
Stuttgart: B. G. Teubner 1977. 256 S.
= Teubner Studienbücher der Geo-
graphie.
- ROTH, D. D.
Wetterkunde für alle, die wandern,
bergsteigen, segeln, fliegen, jagen,
fischen, säen, ernten: BLV Wetter-
führer.
München, Bern, Wien: BLV Verlags-
gesellschaft 1977. 247 S. = BLV Be-
stimmungsbuch. 20.
- KURZ, M.
Synoptische Meteorologie.
Offenbach a. M.: Deutscher Wetter-
dienst. 1977. 127 S. = Leitfäden für
die Ausbildung im Deutschen Wet-
terdienst. Nr. 8.

Ankündigung

Call for Papers

Sixteenths OSTIV Congress

20–29 July 1978, Chateauroux, France

The Sixteenth Congress of the International Scientific and Technical Gliding Organization "OSTIV" (Organisation Scientifique et Technique Internationale du Vol à Voile) will be held at the site of the World Gliding Championships in Chateauroux, France, from July 20–29, 1978. Technical and scientific sessions, some joint, will be conducted at the Gliding Centre at Chateauroux, which is situated about 200 km south of Paris and can be reached by train from Paris—Austerlitz station.

The program of the Scientific Sessions will be concerned with, but not restricted to, the following topics:

Structure of thermals and convective fields

Organized convection systems

Studies of cloud physics and convective precipitation using sailplanes

Airflow over extended mountain ranges

Energy and momentum fluxes in lee-waves and in the atmospheric boundary layer

Characteristics of the convective boundary layer

Further exploration of "thermal waves"
Use of powered sailplanes as inexpensive platforms for atmospheric research
Optimum meteorological flight techniques

Forecasting for soaring pilots

Joint sessions with the Technical Section are under consideration on the following subjects: Dynamic soaring — Man powered flight — Hang gliding. Papers are invited on the above topics and related subjects. Abstracts of 200

to 300 words (or drafts of the completed papers, if available) with name and affiliation of the author should be sent without delay, but not later than 10 March, 1978, to:

Dr. Joachim P. Kuettnar
Chairman, OSTIV Scientific Section
National Center for Atmospheric
Research
P.O. Box 3000
Boulder, Colorado 80307, USA

Complete manuscripts (double spaced on standard-size paper with figures in printable form) should be available at the beginning of the Congress.

Projection facilities will consist of:

- 1) 50 x 50 mm slide projector (for 35 mm slides)
- 2) overhead projector (transparencies)
- 3) 8 mm and 16 mm movie projector

Ankündigung

GATE-Symposium on Oceanography and Surface Layer Meteorology 1978

Das GATE-Symposium findet vom 16. bis 20. Mai 1978 in Kiel statt. Es sollen Ergebnisse des ozeanographischen Unterprogramms und des Grenzschicht-Unterprogramms dargestellt und zusammengefaßt werden. Der Schwerpunkt liegt auf Vorgängen im Ozean und in der Atmosphäre, die durch „air-sea interaction“ beeinflußt werden.

Die örtliche Organisation liegt in Händen von Prof. Dr. G. Siedler. Einzelheiten sind zu erfahren über

The Organizing Committee
GATE-Symposium
c/o Institut für Meereskunde
Düsternbrooker Weg 20
2300 Kiel 1

Vorläufige Anmeldungen sowie Vortragsumfassungen sollen bis 10. 12. 1977 dort vorliegen.

Es können laut Rundschreiben des Organisationskomitees alle Wissenschaftler teilnehmen, die mit GATE-Auswertungen befaßt sind.

Anschrift des Autors

Dr. B. J. Mason
Meteorological Office
London Road
Bracknell, Berkshire RG 12 2SZ
England

Manuskriptsendungen werden erbeten an:

Deutscher Wetterdienst
Hauptschriftleitung „promet“
Frankfurter Straße 135
6050 Offenbach (Main)