

promet

1/2'80

meteorologische fortbildung

Klimamodelle



Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter

M. Schlegel
Frankfurter Straße 135
6050 Offenbach am Main

Redaktionsausschuß

A. Cappel (Neustadt a.d.W.)
F. Defant (Kiel)
H.-W. Georgii (Frankfurt)
K. H. Hinkelmann (Mainz)
H. Hinzpeter (Hamburg)
E. Lingelbach (Offenbach)
H. Reiser (Offenbach)
H.-P. Schmitz (Berlin)
R. Simonis (Offenbach)
S. Uhlig (Traben-Trarbach)
F. Wippermann (Darmstadt)

Zum Titelbild

Holzchnitt aus dem Buch von W. Scheidig: Die Holzschnitte des Petrarca-Meisters, Berlin, Henschelverlag 1955.

Das Original erschien erstmals 1532 in Augsburg als Illustration zur deutschen Übersetzung von Petrarca* „De Remediis utrisque Fortunae“ und trägt den Titel „Von vielfältiger Hoffnung“.

Sprichwörtliche Weisheit ist in diesem Bilde verarbeitet, so u. a. „Hoffen heißt Wolken fangen wollen“. Ein Zusammenhang mit dem Hauptthema könnte darin gesehen werden, daß der Mensch (Klimamodellierer) mit den beiden Hauptbestandteilen des Klimasystems Atmosphäre (Wolken) und Ozean (Wellen) zu kämpfen hat. Eine weitergehende Interpretation dieser sinnbildlichen Darstellung wird jedem Betrachter selbst überlassen . . .

* Francesco Petrarca, römischer Dichter und Philosoph (*1304 †1374)

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

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

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

ISSN 0340 - 4552

Meteorologische Fortbildung

10. Jahrgang, Heft 1/2, 1980

Thema des Heftes:

Klimamodelle

(Fachliche Redaktion: J. Egger und W. Metz, München)

Beiträge

	Seite
Vorbemerkungen (J. EGGER)	1
1 K. FRAEDRICH Einfache Klima-Modelle	2
2 H. GRASSL Energiebilanz-Klimamodelle	6
3 M. HANTEL Zonal gemittelte Klimamodelle	12
4 K. HERTERICH Stochastische Klimamodelle	19
5 H. REISER und V. RENNER Zirkulationsmodelle	23
6 W. METZ Modelle für einzelne Klimamechanismen	30
Institute stellen sich vor European Centre for Medium Range Weather Forecasts (R. NEWSON)	34
Berichte über Fortbildungsveranstaltungen und Tagungen Kurs über „Numerische Wettervorhersage“ im Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersagen (W. WERGEN)	39
Fortbildungsveranstaltung „Climatic Variations and Variability – Facts and Theories“ . . . (V. VENT-SCHMIDT)	44
Internationales Alfred-Wegener-Symposium Deutsche Meteorologen-Tagung 1980 (M. SCHLEGEL)	46
Das interessante Satellitenbild METEOSAT-Bilder in drei Spektralbereichen (G. STEINHORST und H. WOICK)	48
Blick zurück Phänologische Beobachtungen der Societas Meteorologica Palatina (A. CAPPEL)	52
Aus dem Deutschen Wetterdienst Bericht über die Aufgaben und Tätigkeiten der Zentralen Agrarmeteorologischen Forschungsstelle Braunschweig (H. SCHRÖDER)	53
Das BKF-Modell als Basis zur Erstellung maschinell-manueller Vorhersagekarten in der Analysen- und Vorhersagezentrale des Deutschen Wetterdienstes (W. PEYINGHAUS)	56
Aus dem Geophysikalischen Beratungsdienst der Bundeswehr Geophysikalische Probleme der RADAR-Ortung (K. E. FISCHER)	58
Habilitationen, Promotionen und Diplom-Hauptprüfungen im Fach Meteorologie an den Universitäten der Bundesrepublik Deutschland und West-Berlins im Jahre 1979	61
Neuerscheinungen	64
Ankündigung (IAMAP-Tagung)	3. Umschlags.

2

H. GRASSL, Hamburg

Energiebilanz-Klimamodelle

1 Einleitung

Die meisten der bekanntgewordenen Klimamodelle werden Energiebilanzmodelle genannt, weil in ihnen von den Erhaltungsgleichungen explizit nur die Energiegleichung auftritt. Häufig werden sie auch als Gleichgewichtsmodelle oder als quasistationäre bezeichnet, und weil sie mit gemittelten Größen rechnen, hat sich auch der Name "statistisch-dynamische Modelle" eingebürgert. Sie unterscheiden sich von den explizit-dynamischen Modellen vor allem durch die geringere Breite und veränderte Lage des betrachteten Frequenzspektrums, was gleichbedeutend ist mit erhöhter Mittelungszeit und daher auch meist stärkere räumliche Mittelung nach sich zieht. Die explizit-dynamischen Modelle betrachten noch Schwankungen im synoptischen Bereich, während Energiebilanzmodelle erst Schwankungen von Variablen bestimmen, die über einen Monat, eine Jahreszeit oder gar ein Jahr gemittelt werden. Diese über entsprechend lange Zeiten gemittelten Variablen heißen Klimavariablen. Die entscheidende Schwäche der Energiebilanzmodelle ist damit schon ausgesprochen: Der Zwang zur Parametrisierung mindestens der Effekte im synoptischen Bereich bis hin zum Jahresgang, wenn z.B. mit Jahresmitteln gerechnet wird. Parametrisierung heißt in diesem Zusammenhang Darstellung kleinskaliger, nicht explizit erfassbarer Prozesse durch mittlere Größen oder, verdeutlichend, Darstellung z.B. der meridionalen Transporte, welche wesent-

lich durch synoptische Prozesse erfolgen, durch großräumige Temperaturgradienten.

Warum trotzdem besonders viele Energiebilanzmodelle in den letzten Jahren wie Pilze aus dem Boden schossen, liegt hauptsächlich an der geringen bis erträglichen Rechenzeit im Vergleich zum Aufwand der explizit-dynamischen Modelle, die in ihrer ausführlichsten Form, den allgemeinen Zirkulationsmodellen, auf der Jagd nach den größten erreichbaren Rechneranlagen sind. Wie die allgemeinen Zirkulationsmodelle auch, sollen die Energiebilanzmodelle so weit wie möglich auf den Erhaltungssätzen der Masse, des Impulses und der Energie, sowie den Zustandsgleichungen einzelner Systemkomponenten wie Inlandeis, Ozean, festes Land, Biosphäre und Atmosphäre aufbauen. Nach einer strengen, hier adoptierten Definition wäre ein Rechenmodell als Klimamodell nur dann zu bezeichnen, wenn es 1) ausgehend von Näherungen der Erhaltungssätze, mindestens jedoch energieerhaltend, Klimavariablen für einen bestimmten geographischen Bereich bestimmbar macht und 2) dazu nur physikalische sowie planetarische Konstanten benötigt, 3) innere irreversible Flüsse von Wärme, Impuls und Masse parameterisiert und 4) möglichst wenige Klimavariablen wie z.B. den Bedeckungsgrad durch beobachtete Werte vorschreibt. Damit sind Modelle, die z.B. die Wärmeflüsse vom Ozean in die Atmosphäre vorschreiben, ausgeschlossen.

2 Grundgleichungen und zeitliche sowie räumliche Mittelung

Um die Aussagekraft eines Modells zu verstehen, sollte – ausgehend von den Erhaltungssätzen für Masse, Energie und Impuls, sowie den Zustandsgleichungen der Systemkomponenten in nicht zeitlich und räumlich gemittelter Form – für jeden einzelnen Term der Ausgangsgleichungen sein Verbleiben und, falls ja, seine Bedeutung nach zeitlicher und räumlicher Mittelung abgeschätzt werden können. Dazu werden zunächst in Abschnitt 2.1 die Ausgangsgleichungen vorgestellt, dann in Abschnitt 2.2 Möglichkeiten der Mittelung beschrieben und in Abschnitt 3 schließlich die einzige von den Ausgangsgleichungen übrigbleibende, verstümmelte Energiegleichung eines speziellen Klimamodells vorgestellt. In Abschnitt 4 werden Ergebnisse einiger Modelle gezeigt und Abschnitt 5 soll mit einer kritischen Betrachtung der Energiebilanzmodelle schließen.

2.1 Grundgleichungen

Obwohl nur Teile der das Klimasystem beschreibenden Gleichungen für die Diskussion der Energiebilanzmodelle notwendig sind, sollen doch alle Ausgangsgleichungen vorgestellt werden, um die Reduktion der beschriebenen physikalischen Prozesse in den Energiebilanzmodellen aufzuhellen.

Die Erhaltung der Masse, meist als Kontinuitätsgleichung bezeichnet, lautet in lokaler Form, hier für die Massendichte oder einfacher, die Dichte ρ formuliert,

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v}_c - \nabla \cdot (\Sigma_j F_j), \quad [1]$$

d.h. die Änderung der Dichte ρ wird verursacht durch Divergenzen der Massenflußdichte des Trägermediums $\rho \nabla \cdot \mathbf{v}_c$ (z.B. Luft oder Wasser, 1. Term) und der anderen j-Stoffkomponenten (z.B. Wasser in verschiedenen Aggregatzuständen, 2. Term).

Die 2. Grundgleichung, die Erhaltung des Impulses, meist als Bewegungsgleichung formuliert und damit zeitliche Änderungen des Impulses als durch alle angreifenden Kräfte verursacht darstellend, wird in den eindimensionalen Energiebilanzmodellen stets, in zweidimensionalen fast immer nicht berücksichtigt. Damit können diese Modelle z.B. Eigenheiten der Zirkulation, wie den Monsun, überhaupt nicht beschreiben. Selbst die explizit-dynamischen Modelle berücksichtigen meist nur wenige der angreifenden Kräfte.

Die 3. Grundgleichung, die Energiegleichung, basierend auf dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik, wird meist nicht als Gleichung der Erhaltung der Gesamtenergie geschrieben, sondern für die nicht der Erhaltung unterworfenen inneren Energie, und hat damit lokale Quellen und Senken.

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (\mathbf{R} + \mathbf{W} + \mathbf{L}) + \rho Q + D \quad [2]$$

Die zeitliche Änderung der inneren Energie e wird also verursacht durch die Divergenz des Nettostrahlungsflusses \mathbf{R} , des fühlbaren Wärmeflusses \mathbf{W} – verursacht durch subsynoptische Bewegungen im molekularen, mikroturbulenten und konvektiven Größenbereich – und des latenten Wärmeflusses \mathbf{L} durch Phasenumwandlungen hauptsächlich des Wassers. Weiterhin sind die Quellen der inneren Energie die Wärme durch radioaktiven Zerfall ρQ und die Dissipation kinetischer Energie oder Reibung D .

Die 4. Grundgleichung, die Zustandsgleichung, beschreibt Materialeigenschaften, indem sie die innere Energie e und die Dichte ρ eines Teils des Klimasystems als Funktionen des Drucks p , der Temperatur T und der Massenmischungsverhältnisse m_j der beteiligten Substanzen vorstellt.

2.2 Mittelungsmöglichkeiten für die Grundgleichungen

Energiebilanzmodelle sind häufig nur eindimensional und werden auf zeitliche Mittelwerte angewandt, daher müssen zu ihrem Verständnis alle durchgeführten Mittelungen bekannt sein. Der zeitliche Mittelwert $\bar{\psi}$ einer Variablen ψ , welche außer von der Zeit von der geographischen Länge λ , der geographischen Breite φ und der Höhe z abhängt, muß somit auch noch räumlich gemittelt werden.

Warum sogar noch Ergebnisse eines 0-dimensionalen Modells (globales Modell) brauchbar erscheinen, obwohl doch alle in der 7. Spalte in Tabelle 2.1 aufgeführten Abweichungen für die volle Beschreibung des Klimasystems notwendig wären, liegt meist an der speziellen Fragestellung und aber auch am geringen Verständnis des Klimasystems insgesamt. Möchte man nur einen Rückkopplungsmechanismus untersuchen, so ist das einfachere Modell für das Verständnis der Rückkopplung häufig besser, weil im umfangreichen Modell durch Zusammenspiel vieler Prozesse das Endergebnis häufig nicht sinnvoll interpretierbar ist.

Eine Einteilung der Klimamodelle entsprechend ihrer physikalischen Eigenschaften, welche auf der Hand liegen sollte, aber weniger systematisch wäre, wird durch Tabelle 1 recht gut erfaßt: vertikale und horizontale Mittelung z.B. ist mit der Eliminierung der Bewegungsgleichung gleichbedeutend. Energiebilanzmodelle sind hauptsächlich auf die Symbole $\bar{\psi}$, $\bar{\psi}$, $\langle \bar{\psi} \rangle$, $\bar{\psi}$ in Tabelle 2.1 beschränkt. Sie sind also meist eindimensional. Falls es auch zweidimensionale oder sogar dreidimensionale Energiebilanzmodelle gibt, sind in diesen mögliche Aussagen über das dynamische Verhalten, also über Zirkulationseigenschaften wie die Hadley-Zelle oder den Monsun, nicht ergriffen worden. Von den Energiebilanzmodellen sollen nur solche mit Empfindlichkeitstests besprochen werden, weil Stabilitäts- und Eindeutigkeits-Untersuchungen bereits in diesem Heft von K. FRAEDRICH diskutiert werden. Empfindlichkeitstest heißt hier Änderung externer Parameter wie Solar-konstante, Zusammensetzung der Atmosphäre, also auch Berücksichtigung der Folgen menschlicher Aktivität.

3 Energiegleichung eines vertikal integrierten Energiebilanzmodells

Als ein Beispiel sollen diese in Tabelle 2.1 mit ● bezeichneten Modelle auf den Inhalt ihrer Energiegleichung untersucht werden.

$$\frac{\partial}{\partial t} (e_A + e_O + e_K + e_{BL}) =$$

lokale zeitliche Änderung
der mittleren inneren
Energie e aller System-
komponenten in einer
vertikalen Säule

$$\mathbf{V}_h \cdot (e_A \mathbf{v}_A + e_O \mathbf{v}_O) + \nabla \cdot \mathbf{R} + L_v(K - V) + L_s(E + E_w) \quad [3]$$

horizontaler Nettofluß
innerer Energie in Ozean
(O) und Atmosphäre (A)

Quellen und Senken
innerer Energie

Tabelle 2.1: Hierarchie der räumlichen und zeitlichen Auflösung in Klimamodellen mit Angabe der typischen Vertreter eines speziellen Modells

Zahl der Dimensionen	Bezeichnung der Dimensionen	Mittelungstyp	Mittelungsdauer	räumliche Mittelung	Bezeichnung (1) des Mittelwertes	Bezeichnung der Abweichung	typische Vertreter der Energiebilanzmodelle
3	λ, φ, z	keine Mittelung	Betrachtung des Momentanwertes	Betrachtung lokaler Werte	Momentanwert ψ	existiert nicht	—
3	λ, φ, z	zeitlich und räumlich	Minuten bis Stunden	entsprechend Gitterkonstanten	Synoptischer Wert $\bar{\psi}_s$	subsynoptische Schwankung	—
3	λ, φ, z	zeitlich und räumlich	einige Wochen (Integrations-schritt jedoch Minuten)	entsprechend Gitterkonstanten	Klimamittelwert $\bar{\psi}$	Schwankungen des Wetters, Witterungstypen	ADEM 1965
* 2	φ, z	zeitlich und zonal	meist 1 Monat	über Teile oder einen ganzen Breitenkreis	zonal gemittelter Klimawert $\langle \bar{\psi} \rangle$	Abweichung vom zonalen Mittel	ADEM 1963 MANABE u. Strickler 1964
• 2	λ, φ	zeitlich und vertikal	meist 1 Monat	vertikale Mittelung über Ozean, Eis, Atmosphäre	vertikal gemittelter Klimawert $\overline{\bar{\psi}}$	Abweichungen vom vertikalen Mittel	ADEM 1970 SELLERS 1976
*○ 1	z	zeitlich, zonal und meridional	meist Jahresmittelwert als stationärer Endzustand	Globale Mittelung für bestimmte Höhen	globaler Mittelwert in der Höhe z $\tilde{\psi}$		MÖLLER 1961 MANABE u. WEATHERALD 1967
•* 1	φ	zeitlich, zonal und vertikal	“	zonale und vertikale Mittelung, oft Aufspaltung in Ozean und Land	höhenintegriertes Längenmittel $\langle \overline{\bar{\psi}} \rangle$		DEFANT 1921 BUDYKO 1969 SELLERS 1969 PALTRIDGE 1978
•* 1	λ	zeitlich, meridional und vertikal	“	meridionale u. vertikale Mittelung	höhenintegriertes Breitenmittel		SALTZMAN 1967
* 0		zeitlich und global	stationärer Endzustand	Reduktion der Erde auf einen Punkt	Globaler Mittelwert $\approx \bar{\psi}$		MÖLLER 1963 FRAEDRICH 1978 SCHNEIDER u. MASS 1976

○ Speziell zur Untersuchung des Einflusses der Bewölkung geeignet

* Klimamodelle dieser Typen sind stets Energiebilanzmodelle

(1) Die Bezeichnungsweise wurde von SALTZMAN 1978 übernommen, dessen umfangreiche Abhandlung als vertiefende Lektüre empfohlen wird.

In Gleichung [3] wird die innere Energie e aller vier Klimakomponenten, nämlich der Atmosphäre (A), des Ozeans (O), der Kryo- oder Eissphäre (K) und der Bio-Lithosphäre (BL) als durch horizontale Transportprozesse (1. Term rechts) und Quellen oder Senken (2. Term rechts) verursacht beschrieben. Da Bewegungen eines Inlandeises und der Biolithosphäre für den Mittelungszeitraum der Modelle klein sind gegen die mittlere horizontale Geschwindigkeit in Atmosphäre v_A und Ozean v_O , fehlen in Gleichung [3] alle diesbezüglichen Transporte. Sehr häufig wird auch $\partial/\partial t (e_K, e_{BL}) \approx 0$ gesetzt. Als wesentlichste lokale Quellen oder Senken bleiben neben der Strahlungsbilanz am Außenrand der Atmosphäre $\nabla \cdot R$, dem Ursprung aller Zirkulationsphänomene im Klimasystem, noch die beiden Terme $L_v(K-V)$ und $L_s(E+E_W)$. Sie beschreiben Phasenänderungen des Wassers. $L_v(K-V)$ ist eine Quelle innerer Energie, wenn – summiert über die gesamte vertikale Säule – die Verdunstungsrate V kleiner bleibt als die Kondensationsrate K . $L_s(E+E_W)$ ist eine Quelle innerer Energie, wenn die gesamte Eisbildungsrate E (an der Oberfläche) + E_W (in den Wolken) positiv ist. L_v und L_s sind die Verdampfungs- bzw. Schmelzwärme des Wassers.

Die einzelnen Modelle unterscheiden sich hauptsächlich noch in der Art der Darstellung der Wärmeflüsse und Phasenumwandlung, was auch Vernachlässigung einzelner Terme bedeuten kann. Weiterhin ist die Art der Integration von Gleichung [3] unterschiedlich. Fast allen Modellen ist die Behandlung der Temperatur als Hauptklimagröße eigen, weil fast alle Terme in Gleichung [3], wie auch die innere Energie selbst, über $e = \text{Masse} \times \text{spezifische Wärme} \times \text{Temperatur}$ so stark und eindeutig von der Temperatur abhängen.

4 Ergebnisse von Energiebilanzmodellen für das Klima der Erde

Wie in einzelnen Modellen selbst soll auch hier zunächst der Vergleich mit dem jetzigen Klima und dann die Änderung der Hauptklimagrößen wie Temperatur und meridionaler Transport bei Änderung externer Parameter besprochen werden. Eine Verifizierung, d.h. gute Übereinstimmung zwischen Modell und jetzigem Klima, kann durch Drehung an "Parameterisierungsschrauben" fast immer erreicht werden, so daß eigentlich die Berechtigung zur Beantwortung weitreichender Fragen, wie der des Einflusses einer CO_2 -Zunahme auf die Temperaturen, auf recht wackeligen Beinen steht. Zusätzlich sind mögliche verstärkende oder dämpfende Faktoren, wie z.B. der Bedeckungsgrad, fast immer auf klimatologische Mittelwerte fixiert. Daher ist die Bereitstellung von Paläoklimadaten eine wesentliche Hilfe, denn erst wenn Modelle diese zeitabhängig beschreiben können, kann überhaupt an eine Prognose gedacht werden. Die entscheidende Schwäche ist jedoch die Negation aller Abweichungen von den Mittelwerten (in Tab. 2.1, Spalte 7). Nur die noch in ihren Anfängen stehenden stochastischen Modelle berücksichtigen diese Abweichungen. Sie allein können ohne Variation externer Parameter Klimaschwankungen erklären (siehe dazu K. HERTERICH in diesem Heft). In reinen Energiebilanzmodellen kann eine Klimaschwankung nur durch Änderung äußerer Parameter – eingeschlossen die Zusammensetzung der Atmosphäre und damit der Einfluß menschlicher Aktivität – herbeigeführt werden.

Als Beispiel für die Verifizierung in einem eindimensionalen, nur noch breitenabhängigen Modell mit vertikaler In-

tegration ($\langle \psi \rangle$ in Tab. 2.1), getrennt zwischen Ozean und Atmosphäre und unter Berücksichtigung der prozentualen Verteilung von Land und Ozean – also eigentlich einem etwas mehr als eindimensionalen Modell – zeigt Abbildung 1 den recht guten Vergleich zwischen gemessenen und berechneten meridionalen Energieflüssen. Die zeitliche Mittelung betrug einen Monat und die Energiegleichung wurde als gemischtes Anfangswert- und Grenzwertproblem gelöst. Dies bedeutet Berechnung des stationären Zustandes oder Vernachlässigung der Zeitabhängigkeit, aber gleichzeitig Abhängigkeit vom Ausgangspunkt der Rechnung. Wird die Solarkonstante um 1% erniedrigt, tritt wegen der außerordentlichen Zunahme der eisbedeckten Flächen eine drastische Temperaturniedrigung von $\sim 7^\circ\text{C}$ ein. Die der Eis- oder Schneebedeckung nimmt die Albedo zu, was verringertes Energieangebot bedeutet und dadurch verringertes Energieangebot bedeutet und somit dadurch weiteren Anreiz zur Eisbildung bietet. Daß die Temperaturänderungen bei unterschiedlicher Richtung der Änderung verschieden ausfallen, also ein Hysteresiseffekt auftritt, mag auch nur ein Produkt der speziellen Rechenmethode und Parameterisierung sein.

Die zeitliche Abhängigkeit von Klimavariablen, die nach Gleichung [3] auch berechnet werden kann, falls zeitabhängige Parameterisierungen aufgrund von langjährigen Beobachtungen vorliegen, ist verglichen mit den in den Abbildungen 2.1 und 2.2 gezeigten Rechenergebnissen für stationäre Systeme recht wenig bearbeitet worden. In Abbildung 2.3a wird der historisch bekannte Teil der Mitteltemperatur der nördlichen Erdhälfte von 1890–1970 mit den zeitabhängigen Modellergebnissen verglichen. Das 0-dimensiona-

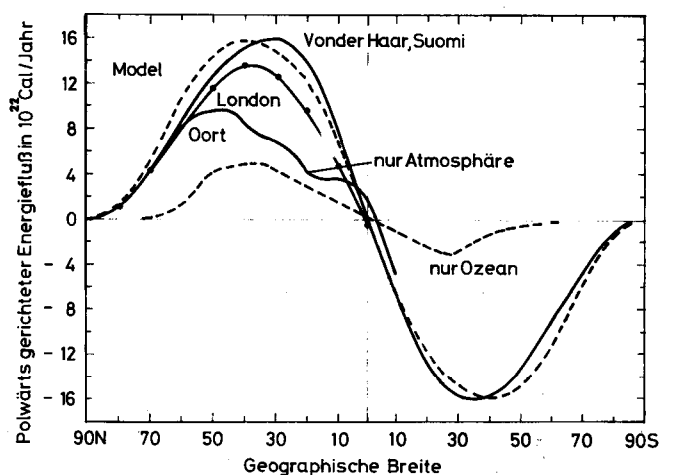


Abb. 2.1: Verifizierung von Modellergebnissen mit beobachteten Daten: hier Breitenabhängigkeit des meridionalen Wärmetransports. Aus Messungen abgeleitete Werte sind durchgezogen und mit Autorennamen versehen, Modellergebnisse nach SELLERS (1973) erscheinen gestrichelt.

le Modell (in Tab. 2.1 mit Mittelungszeichen $\langle \psi \rangle$ versehen) enthält in der Energiegleichung nur noch die von kurz- und langweiliger Strahlung herrührenden Terme, welche in Gleichung [3] in $\nabla \cdot R$ zusammengefaßt sind. Allein bei Vorgabe der zeitlichen CO_2 -Zunahme, der atmosphärischen Trübung durch Vulkane und menschliche Aktivität wird

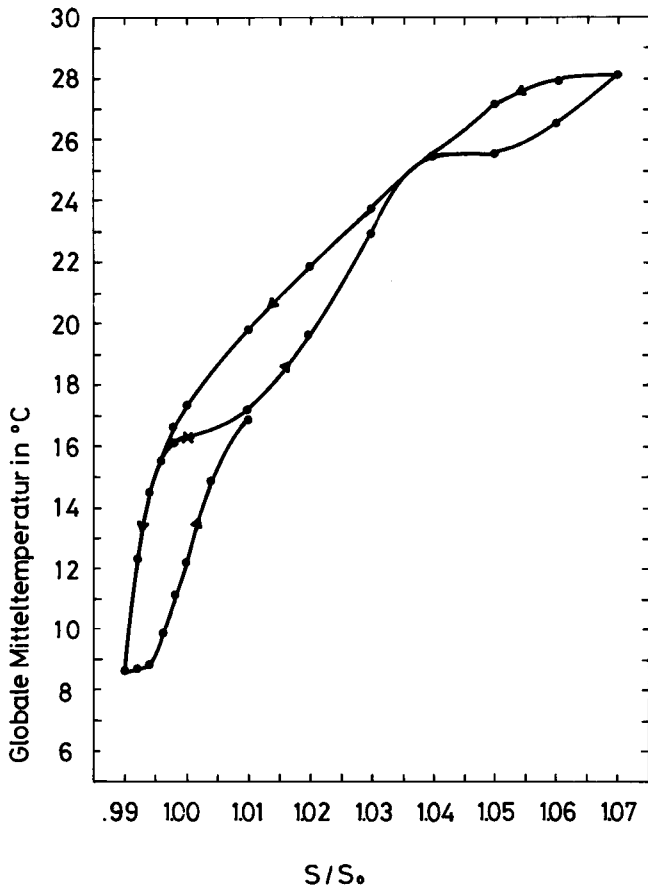


Abb.2.2: Änderungen der globalen Mitteltemperatur für den August bei Änderung der Solarkonstanten S_0 , ausgedrückt in Bruchteilen des jetzigen Wertes von 1360 W m^{-2} (nach SELLERS, 1973). Die Pfeile geben die Änderungsrichtung an.

ohne jede Änderung der Solarkonstanten der in Abbildung 2.3a wiedergegebene, die Beobachtungen gut annähernde Verlauf gefunden. Hiermit deutet sich vielleicht die zukünftige Hauptverwendungsart der Energiebilanzmodelle an: Berechnung der zeitunabhängigen Klimagrößen in säkularen Zeitbereichen, in denen größere Modelle nicht mehr zu vertretendem Rechenaufwand verursachen und wahrscheinlich auch die Strahlungsparameterisierung allein den wesentlichen Prozeß trifft.

Dieser Weg zurück in die Klimageschichte, um dann später auch voraussehen zu können, wird betont in Abbildung 2.3b und noch weiterbesprochen in Abbildung 2.4. Der Versuch, die Intensivphasen und Wärmezeiten in der jetzigen Eiszeit der späten Erdneuzeit allein durch Bahnparameteränderungen der Erde (der sog. Milankovic-Theorie) nachzuvollziehen, zeigt zwar wie in Abbildung 1.3b Reaktionen mit dem richtigen Vorzeichen und trifft die Intensivphasen der Eiszeit wohl, kann aber den großen aus Paläo-Klimadaten abgeleiteten Temperaturunterschied der Nordhalbkugel von bis zu 8°C nur zu maximal $2,4^\circ\text{C}$ nachvollziehen. Dieses Ergebnis läßt, weil Bahnparameterschwankungen wahrscheinlich ein wesentlicher Mechanismus für Klimaschwankungen sind, nur den Schluß zu, daß weitere mögliche Rückkoppelungen nicht durch die im 2-dimensionalen (φ, z) -Modell mit Jahreszeitenmitteln enthaltene Parameterisierung erfaßt wurden. 1979 von CESS und

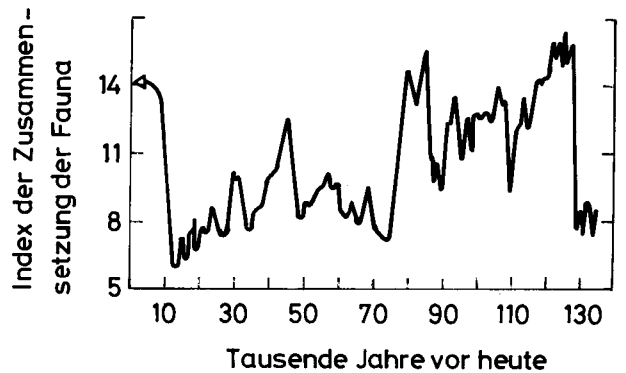
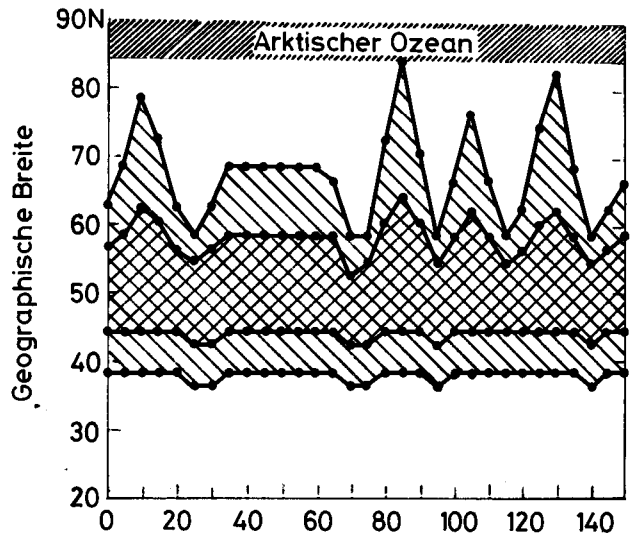
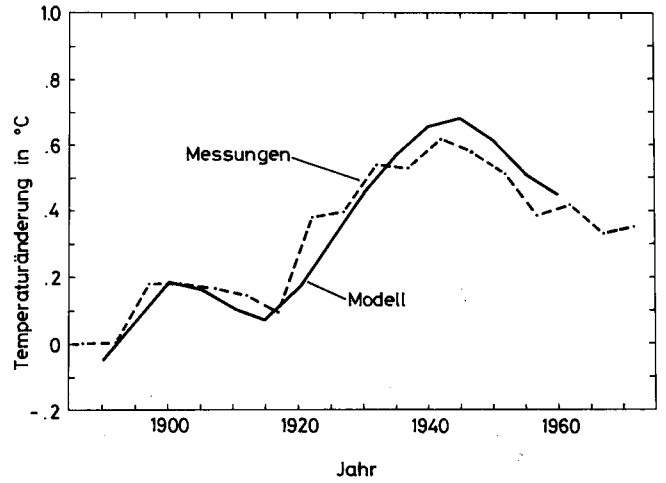


Abb. 2.3: Zeitabhängigkeit zweier Klimagrößen.
 a) Gang der hemisphärischen Mitteltemperatur (nach BRYSON u. DITTBERNER, 1976) während der letzten 80 Jahre.
 b) Oberer Bildteil: Südlichste und nördlichste Grenze der Schneebedeckung (unterste und oberste Kurve) und der Eisbedeckung (mittlere Kurve) für die nördliche Erdhälfte während der vergangenen 150.000 Jahre nach HELD und SUAREZ (1976).
 Unterer Bildteil: Paläotemperaturen (dargestellt durch ein Maß für die Planktonzusammensetzung) abgeleitet aus Tiefseesedimenten im Nordatlantik.

WRONKA vorgeschlagene Rückkoppelungen wie

- Albedoänderungen mit dem Zenitwinkel,
- Erdbodenalbedoänderungen bei veränderter Niederschlagsverteilung durch Reaktionen der Vegetation, sowie
- veränderter Transport latenter Wärme bei Temperaturänderungen

sind als positiv, d.h. verstärkend abgeschätzt worden.

Einen noch weiter zurückreichenden Versuch der Anwendungsmöglichkeit von Energiebilanzmodellen stellt Abbildung 2.4 dar. In einem 3-dimensionalen (λ, φ, z)-Modell mit Monatsmitteln wurde jeweils eine stationäre Lösung für eine vorgegebene Kontinentverteilung gesucht und somit die hauptsächlich von Geologen vorgeschlagene Erklärung für Eiszeiten auf der Erde untermauert: je näher ein Kontinent zu einem geographischen Pol liegt, um so stärker ist eine Vereisungsmöglichkeit. So fällt die Jahresmitteltemperatur im Breiten Gürtel von $60-70^\circ\text{N}$ von ca. 7°C auf Werte unter 0°C , wenn der Landanteil von 0 auf knapp 100% steigt, wie dies während der letzten 200 Millionen Jahre geschah.

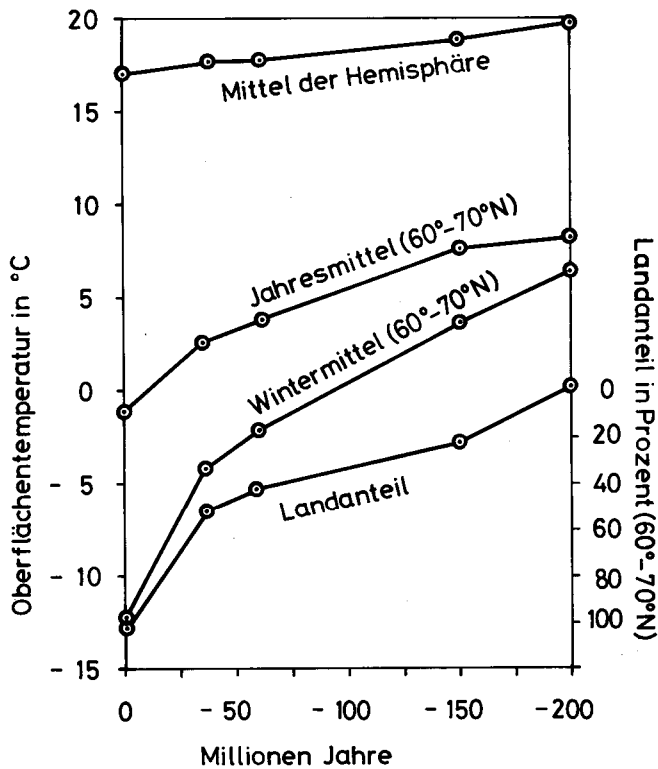


Abb. 2.4: Geologischer Rahmen des Klima nach DONN u. SHAW (1975). Berechnete mittlere Temperaturen für die letzten 200 Millionen Jahre (nördliche Erdhälfte, Jahresmittel $60-70^\circ\text{N}$, Wintermittel $60-70^\circ\text{N}$) sowie Landanteil in Prozent in der Breitenzone $60-70^\circ\text{N}$ als Maß für die Vereisungsmöglichkeit.

Alle bisher besprochenen Modelle basierten auf der zeitlich und räumlich gemittelten Energiegleichung wie in Gleichung [3]. In Abbildung 2.5 werden ebenfalls Ergebnisse zweier Energiebilanzmodelle gezeigt; diese Modelle jedoch benutzen eine Zusatzbedingung: Sie maximieren die Entropieproduktion durch den meridionalen Wärmetransport, um damit die Parameterisierung der Transporte und auch des Bedeckungsgrades zu umgehen und diese

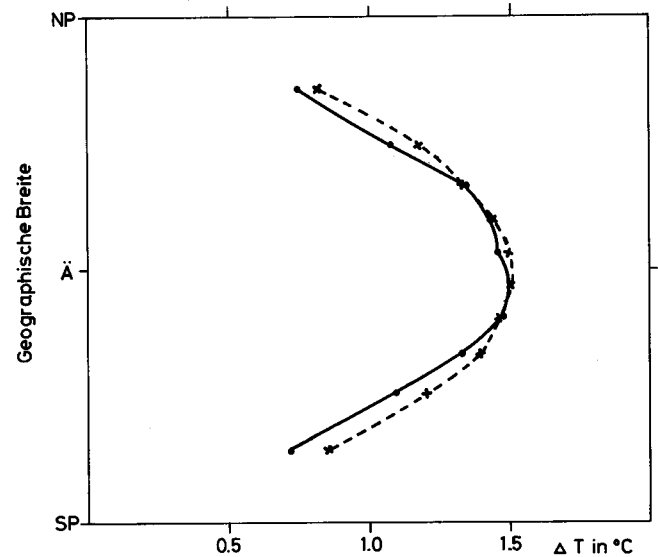
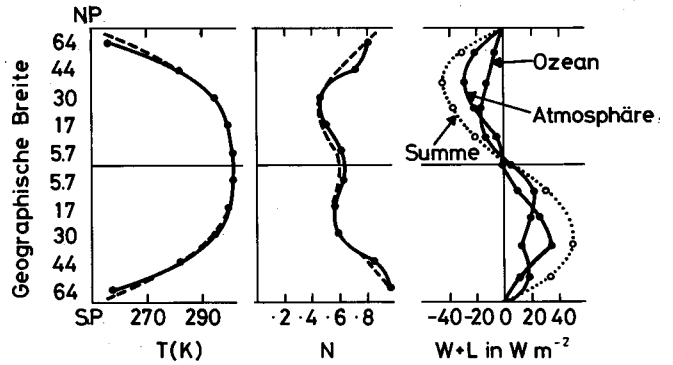


Abb. 2.5: Energiebilanzmodelle mit Nebenbedingungen.

a) Vergleich gemessener Temperaturen T , des Bedeckungsgrades N und der meridionalen Flüsse (nordwärts) mit Modellergebnissen nach PALTRIDGE (1978). Die Nebenbedingung lautet: Maximierung der Entropieproduktion durch meridionale Flüsse, d.h. die gezeigten meridionalen Flüsse stellen sich entsprechend dieser Bedingung ein, sind also nicht parameterisiert.

b) Temperaturänderung bei Verdoppelung des CO_2 -Gehaltes der Luft nach GRASSL (1980) mit (—) und ohne (---) Eis-Albedo-Rückkoppelung. Das verwendete Modell lehnt sich an die Einteilung von PALTRIDGE an. Die üblicherweise in Polnähe gefundene starke Erwärmung tritt hier nicht auf, weil der Bedeckungsgrad bei CO_2 -Zunahme in Polnähe nicht wie auf der übrigen Erde zunimmt und die Eis-Albedo-Rückkoppelung nach LIAN und CESS (1978) verwendet wurde.

als Variable mitzubestimmen. In einem eindimensionalen φ -Modell bei Unterscheidung von Ozean und Atmosphäre sowie Berücksichtigung des Verhältnisses Ozean/Land kann ebenfalls Übereinstimmung mit Beobachtungen erreicht werden (Abb. 2.5a). Die Temperaturänderung bei CO₂-Verdoppelung allerdings zeigt mit dieser Nebenbedingung bisherigen Ergebnissen widersprechende Charakteristika. Weil die bei CO₂-Verdoppelung generell ansteigende Bewölkung in den Polargebieten nur geringfügig zunimmt, wird dort der zusätzliche Glashauseffekt durch CO₂ fast kompensiert. Der geringe Einfluß der Eis-Albedo-Rückkoppelung ist auch auf die nach LIAN und CESS (1978) verwendeten empirischen Daten zurückzuführen, die den ursprünglich (BUDYKO, 1969) extrem positiven Rückkoppelungsmechanismus – der schon bei 1,6%iger Abnahme der Solarkonstanten zur total vereisten Erde führte – stark geschwächt haben. Abb. 2.5b widerspricht den aus Zirkulationsmodellen und Energiebilanzmodellen hergeleiteten starken Erwärmungen in Polnähe. Erneut unterstreicht dies die unzureichende Kenntnis für das Wagnis einer Klimaprognose.

5 Kritik der Energiebilanzmodelle

Die Abbildungen 2.1, 2.3a, 2.3b und 2.5a sowie beinahe unzählige andere lassen gute Übereinstimmung zwischen jetzigem oder vergangenem Klima und Modellergebnissen erkennen, d.h. die Parameterisierung, abgeleitet aus gegenwärtigen Beobachtungen, erfaßt die wesentlichsten Prozesse. Je länger die betrachtete Zeitskala ist, um so unbedeutender werden wahrscheinlich dynamische Prozesse. Energiebilanzmodelle werden daher wohl für Fragestellungen der in Abbildung 2.4 gezeigten Art prädestiniert sein. Gleichzeitig jedoch werden die in unserem Klima angepaßten Parameterisierungskoeffizienten in Klimazuständen weit weg von der jetzigen Warmphase innerhalb einer großen Eiszeit der Erde immer un-

sicherer. Die vielen einfachen Energiebilanzmodelle mit ihren zunächst oft widersprüchlichen Ergebnissen bei Empfindlichkeitstests haben aber doch das Verständnis des Klimas stark gefördert, weil bestimmte Rückkopplungen und Prozesse an und in ihnen besser verstanden werden können als in großen Zirkulationsmodellen; deren Ergebnisse stellen häufig ein Gemisch aus wirklichen physikalischen Prozessen und auflaufenden Rechenfehlern dar, so daß auch aus diesem Blickwinkel die weitere Existenz sehr einfacher Energiebilanzmodelle gesichert erscheint.

Literatur

In dieser Liste sind nur Zitate enthalten, die nicht schon in der zusammenfassenden Arbeit von SALTZMAN (1978) erscheinen.

CRESS, R. D.; WRONKA, J. C.

Ice ages and the Milankovitch theory: A study of interactive climate feedback mechanisms. *Tellus* 31 (1979) S. 185–192.

FRAEDRICH, K.

Structural and stochastic analysis of a zero-dimensional climate system. *Quart. J. Roy. Meteorol. Society* 104 (1978) S. 461–474.

GRASSL, H.

The climate at maximum entropy production by meridional atmospheric and oceanic heat fluxes. (Submitted to *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*)

PALTRIDGE, G. W.

The steady-state format of global climate. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 104 (1978) S. 927–945.

SALTZMAN, B.

A survey of statistical-dynamical models of the terrestrial climate. *Advances in Geophysics* 20 (1978) S. 183–304.