
Grundkurs Klima

Michael Hantel · Leopold Haimberger

Grundkurs Klima

 Springer Spektrum


ÖAW
ÖSTERREICHISCHE
AKADEMIE DER
WISSENSCHAFTEN

Michael Hantel
Wien, Österreich

Leopold Haimberger
Wien, Österreich

ISBN 978-3-662-48192-9

ISBN 978-3-662-48193-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-48193-6

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

FÜR BARBARA UND ROMANA

Vorwort

Das vorliegende Buch *Grundkurs Klima* hat ein Ziel, das bescheiden klingt und doch anspruchsvoll ist. Bescheiden deshalb, weil Sie vom Titel her wahrscheinlich eine Einführung in die Klimatologie erwarten. Die bekommen Sie auch, und so gesehen scheint unser Vorhaben zunächst nur ein weiterer Beitrag unter Hunderten anderer zum aktuellen Klimaproblem zu sein. In früheren Zeiten wusste man immer schon um die praktische Bedeutung des Klimas; die Wissenschaft brachte unserem Thema ein freundliches Interesse entgegen, aber kaum mehr. Das hat sich in den letzten Jahrzehnten dramatisch verändert. Die Gründe dafür sind vielfältig; einer der wichtigsten ist die Tatsache, dass sich das Klima selbst verändert, und dass wir die Ursache dafür sind. Die Auswirkungen reichen weit in die Bereiche gesellschaftlicher Gestaltung hinein.

Das ist aber nicht unser Thema. Der Grund, weshalb wir das Ziel unseres Buches, trotz der harmlos klingenden Ankündigung eines Grundkurses, als anspruchsvoll bezeichnen, ist ein anderer. Wenn man die klassischen Ansätze der Klimatologie durchgeht und auf ihre Aussagekraft abklopft, merkt man, welche Gesetzmäßigkeit dahinter steckt: es ist das *Haushaltsprinzip*. Unser Anliegen ist es, Ihnen das zu demonstrieren. Das Haushaltsprinzip mit seinem Zusammenwirken von *Speicherung S*, *Abfluss A* und *Umwandlung U* der jeweiligen Zustandsgröße ist es, das hinter den vielen neueren Studien beschreibender und modellierender Art erkennbar hervortritt; es besteht in der Forderung, dass die drei Größen *S*, *A*, und *U* sich zu null addieren müssen. Diese unspektakuläre Bedingung in ihren Konsequenzen und in ihrer Tiefe zu erläutern, ist das, nun leider wohl anspruchsvolle, Vorhaben dieses Buches.

Das Haushaltsprinzip ist eine fundamentale konzeptionelle Vereinfachung; wir betrachten es als die begriffliche Grundlage für das quantitative Verständnis des Klimas. Darüber hinaus ist es *notwendig*, um das *Ordnungsproblem der Klimadaten* zu lösen.

Da werden Sie fragen, was anschließend an theoretischer Durchdringung noch kommen kann. Ist das Haushaltsprinzip vielleicht auch *hinreichend* für die *Prognose* der zukünftigen Entwicklung des Klimas? Diese Frage werden wir am Ende stellen,

aber sie führt über das Anliegen dieses Buches hinaus. Wir begnügen uns damit, exemplarisch Stärken und Erfolge ebenso wie die Grenzen der Haushaltsaussagen zu studieren, beschränkt auf ihre diagnostische Anwendung.

Das Buch ist in zwei Teile gegliedert (die im Inhaltsverzeichnis nicht abgebildet sind): *Teil I* umfasst die Methoden (Kapitel Eins bis Drei), *Teil II* die Anwendungen (Kapitel Vier bis Zehn). Dazu gibt es Kapitel 11 mit formalen Anhängen.

- **Kapitel Eins** beschreibt das Klimasystem und das Ordnungsproblem der Klimatologie. Dabei gehen wir die klassischen Lösungsansätze durch. Als eigentliche Lösung führen wir das Haushaltsprinzip ein, das wir mit elementaren Beispielen erläutern und begründen.
- **Kapitel Zwei** behandelt das Identitätsproblem der Fluidpartikel anhand der Kontinuitätsgleichung; insbesondere diskutieren wir den Schritt von der diskreten zur kontinuierlichen Darstellung einer Zustandsgröße. Auf dieser Grundlage stellen wir den Prototyp der Klimahaushaltsgleichung auf. Dies ist der methodische Kern unserer Darstellung, erste Hälfte.
- **Kapitel Drei** behandelt die Methoden der Datenaufbereitung anhand der drei Mechanismen des Haushaltsgesetzes: die *Zeitreihenanalyse*, die *räumliche Analyse* und die *stoffliche Analyse*. Der Zeitreihenanalyse kommt dabei das Hauptgewicht zu. Man braucht sie zunächst, um aus den vorhandenen *Messungen* zu einem wohldefinierten *Klimazustand* zu kommen. Dazu führen wir in das Verfahren der *dynamischen Datenassimilation* ein, mit dem wir die Daten in die Haushalte hineinbringen. Ihre raumzeitliche Variabilität wird nun erneut mit Methoden der Zeitreihenanalyse untersucht. Dies ist der methodische Kern unserer Darstellung, zweite Hälfte.
- **Kapitel Vier bis Zehn** In diesem zweiten Teil des Buches behandeln wir die wichtigsten Haushalte im Klimasystem. Diese betreffen zunächst die *Massenbilanz* von Atmosphäre und Ozean (Kapitel 4). Es folgt der *Bewegungszustand* der Klimafluide (Kapitel 5); das ist der *Impulshaushalt*, der den Wind und die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre sowie das Strömungssystem im Ozean kontrolliert. Der *Energiezyklus* der Geofluide wird in Kapitel 6 besprochen, der *hydrologische Kreislauf* in Kapitel 7. In Kapitel 8 kommt der *Kohlenstoffhaushalt* an die Reihe. In Kapitel 9 beleuchten wir kurz die *Partikelhaushalte* (Wolken und Aerosole) und in Kapitel 10 ansatzweise die Haushalte *lebender Systeme*.

Der *methodische Teil I* des Buches besteht darin, das handwerkliche Rüstzeug der modernen analysierenden Klimatologie bereitzustellen; hier werden die begrifflichen Grundlagen gelegt und breit besprochen.

Der *angewandte Teil II* des Buches ist die Zusammenschau der so entwickelten *globalen Haushaltsklimatologie*, abgeleitet vornehmlich aus den *Re-Analysen* des *Europäischen Zentrums für Mittelfristwettervorhersage* (EZMW). Wir präsentieren sie hier in Form von Karten und Horizontalprofilen des Klimasystems (Atmosphäre, Ozean und Eisschilde).

Bei den Einzelhaushalten ist Gelegenheit, wichtige Klimaphänomene in ihrer Erscheinungsform ebenso wie in ihrer haushaltsmäßigen Bedingtheit zu erläutern.

So kommen wir zu einer zusammenhängenden globalen Klimatologie, deren Stärke eine früher nicht mögliche Vollständigkeit und innere Konsistenz aller betrachteten Felder ist (endgültig erreicht man diesen Idealzustand nie).

Dies ist übrigens auch der Fortschritt der hier präsentierten Klimatologie gegenüber herkömmlichen klimatologischen Datensammlungen. Eine der neueren ist das Werk *Observed Global Climate*, das 2005 in der Reihe *Landolt-Börnstein* erschienen ist [1]. Die damals bearbeiteten Daten waren zentriert um das Zeitintervall 1991–1995. Sie wurden jedoch für die Klimasubsysteme in unterschiedlicher Weise ausgewertet und sind in der Regel nicht gegeneinander abgeglichen. Auf dieses Werk beziehen wir uns mehrfach, insbesondere auf die globalen Karten im dortigen Kapitel 17 (vgl. [2]).

Unser Buch unterscheidet sich noch in einem grundsätzlicheren Sinne vom Typ der herkömmlichen Sammelwerke. Bei diesen stand der Gedanke im Vordergrund, den Fachleuten eine geprüfte Sammlung zuverlässiger Daten der klimatologischen Messwerte zu bieten. Dieses Ziel wird heute nicht mehr durch gedruckte Bücher erreicht; vielmehr werden die Daten aus dem Internet heruntergeladen. Die Aufgabe, außer dem theoretischen Hintergrund auch ausgewertete Felddarstellungen zu bieten, die als Standard der Klimatologie anzusehen waren, erfüllte gerade noch das klassische Werk von Peixoto und Oort [3] für die Klimaforschung des ausgehenden zwanzigsten Jahrhunderts.

Unsere Felder sind daher eher als Illustrationen anzusehen und dürften sich in manchen Details wieder ändern. Von mehr bleibendem Wert sind die inneren Zusammenhänge, die wir herauszuarbeiten versuchen. Unsere Darstellung ist auf Jahresmittel der Periode 2001–2012 und räumlich auf das vertikale Mittel von Atmosphäre und Weltmeer konzentriert. In Einzelfällen zeigen wir auch den Jahresgang und den Langzeittrend. Im Mittelpunkt stehen jeweils die vertikalen *Ströme* und die horizontalen *Transporte*. Diese sind bei einem stationären Klima im *Fließgleichgewicht*; wenn das Klima instationär wird (*Klimaschwankungen, Klimawandel*), ist das Gleichgewicht gestört und die Zustandsgrößen (z. B. Temperatur, Eisbedeckung, Meeresspiegelhöhe) wandern in Richtung auf andere (möglicherweise unerwünschte) Arbeitspunkte ab.

Die letztgenannten Implikationen des Klimawandels behandeln wir in diesem Buch jedoch nicht und verweisen dazu stellvertretend auf den Bericht IPCC-2013 des Weltklimarates und weitere einschlägige Publikationen [4, 5, 6]. Das neue Phänomen des Klimawandels hat zwei Dimensionen: eine *Sachverhaltsdimension*; diese ist von der Wissenschaft theoretisch zu analysieren, das sehen wir als unsere Aufgabe an. Und eine *gesellschaftliche Dimension*; diese ist von der Gesellschaft praktisch zu gestalten – das ist die Aufgabe der Politik.

Diese Trennung der Aufgaben wird übrigens auch vom Weltklimarat [4] angestrebt, obwohl man nicht übersehen kann, dass gerade dessen Berichte bis hin zu IPCC-2013 mit seiner Analyse der gesellschaftlichen Auswirkungen und der möglichen Vermeidungsmaßnahmen tief in die politischen Entscheidungsprozesse hineinreicht. Diese letztere Perspektive steht bei uns nicht im Vordergrund.

Was die Sachverhaltsdimension der Berichte des Weltklimarates angeht, so zeigt es sich, dass deren Schlussfolgerungen in zunehmendem Maße auf Haushaltsargu-

menten aufsetzen. Mit unserem Buch wollen wir nun ein Instrument bereitstellen, um fundiert argumentieren zu können. Die hier präsentierten Methoden kann man lernen (deshalb gibt es im Buch Übungsaufgaben mit Lösungen), sie sind die Grundlage für die Erarbeitung belastbarer Aussagen. Wir betrachten in diesem Grundkurs den scheinbar wenig aufregenden, aber grundlegenden Aspekt: das aller Klimaanalyse zugrunde liegende Haushaltsgesetz in seinen vielfältigen Erscheinungsformen. Dabei hoffen wir, dass Sie Gefallen an diesem Vorgehen finden und nebenbei ein vertieftes Verständnis für die aktuelle Klimadiskussion gewinnen werden.

Einige Aufgabenlösungen sind in der Programmiersprache *Python* formuliert und auch die Codes für manche Bilder sind in Python geschrieben. Sie können als *IPython Notebooks* heruntergeladen werden von:

- http://homepage.univie.ac.at/leopold.haimberger/GrundkursKlima_Bispiele.ipynb bzw.
- http://homepage.univie.ac.at/leopold.haimberger/GrundkursKlima_Loesungen.ipynb

Zusätzlich verweisen wir auf einige instruktive Animationen zu den behandelten Themen im Internet:

1. Modellversuch zum Treibhauseffekt:

<http://www.chf.de/eduthek/Treibhauseffekt/Treibhauseffekt.swf>

Hier wird die Temperaturerhöhung durch CO₂ in einem Glashaus demonstriert.

2. CO₂-Anstieg:

<https://www.youtube.com/watch?v=t0dXjmoA0dw>

Hier wird die zeitliche Veränderung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre an weltweit verteilten Mess-Stationen (Mauna Loa, Südpol etc.) demonstriert.

3. Köppensche Klimaklassifikation.:

<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>

Diese website bietet Animationen für die Perioden 1900–2000 und 2000–2100.

Dieses Lehrbuch richtet sich an Studierende mittlerer Semester im Bachelor-Studium der Umweltwissenschaften, jedoch auch an das allgemein interessierte Publikum. Die Kapitel 1 und 10 sind allgemein und ohne Mathematik verständlich. In den Kapiteln 2 bis 9 sowie im Anhang wird Mathematik gebraucht.

Im Kapitel 2 behandeln wir die Kontinuitätsgleichung der Fluide – da geht es ohne elementare Differenzial- und Integralrechnung nicht ab. Im Kapitel 3 erläutern wir den stochastischen Charakter von Messdaten – da geht es ohne statistische Grundgesetze nicht ab. In den Kapiteln 4 bis 9 werden mathematische Hilfsmittel benutzt, aber die anschauliche Interpretation der Ergebnisse steht im Vordergrund.

Unser Ziel ist es, die an sich einfachen, in den Details aber vertrackten (und mit Mathematik durchsetzten) Begriffsbildungen in ihrer Notwendigkeit verständlich zu begründen. Dabei schrecken wir vor historischen bis hin zu philosophischen Kurzbetrachtungen ebensowenig zurück wie vor didaktisch erklärender Kleinarbeit oder auch mathematischen Zumutungen. Es hilft nichts: Fließgleichgewicht im Klima kann man nicht ohne den Begriff der *Flussdivergenz* und Datengenauigkeit kann man nicht ohne den Begriff der *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* verständlich machen. Wenn Sie Geschmack an dieser Methode finden, dann ist das hier Ihr Klimabuch.

Danksagung

Bei der Vorbereitung dieses Buches haben wir vielfache Beratung, Datenhilfe und sachliche Unterstützung bis hin zu kritischer Durchsicht des Manuskripts von KollegInnen erfahren. Ihnen allen danken wir hiermit, insbesondere:

Bodo **Ahrens**, Frankfurt/Main
Inge **Auer**, Wien
Rainer **Bleck**, Boulder (CO)
Günter **Blöschl**, Wien
Nicolaus **Buhlmann** can.reg., Klosterneuburg
Don **Chambers**, Austin (TX)
Hildegard und Egbert **Dierker**, Wien
Andreas **Hense**, Bonn
Regina **Hitzenberger**, Wien
Dorian **Holzer**, Wien
Helmuth **Horvath**, Wien
Bernhard **Hynek**, Wien
Ruprecht **Jaenicke**, Mainz
Markus **Kottek**, Klagenfurt
Christoph **Kottmeier**, Karlsruhe
Lukas **Kugler**, Wien
Konrad **Mauersberger**, Minneapolis (MN)
Michael **Mayer**, Wien
Hanns **Mooshammer**, Wien
Peter **Nevir**, Berlin
Atsumu **Ohmura**, Zürich
Marianne **Popp**, Wien
Hans **Puxbaum**, Wien
Jörg **Rapp**, Frankfurt/Main
Franz **Rubel**, Wien
Robert **Sausen**, Oberpfaffenhofen
Hauke **Schmidt**, Hamburg
Marion **Schroedter-Homscheidt**, Oberpfaffenhofen
Susanne **Schuck-Zöllner**, Hamburg
Georg Anton **Seyerl**, Wien
Reinhold **Steinacker**, Innsbruck
Martin **Steinheimer**, Wien
Bjorn **Stevens**, Hamburg
Rainer **Stowasser**, Wien
Simon **Tschannett**, Wien
Wilfried **Winiwarter**, Wien

Wir danken ferner:

- Der *Universität Wien*, vertreten durch den Herrn Dekan der *Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie* sowie durch den Vorstand des *Instituts für Meteorologie und Geophysik*, für Bereitstellung von Ressourcen;
- der *Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW)*, vertreten durch ihre *Kommission für Klima und Luftqualität*, für die Schirmherrschaft bei der Herausgabe; sowie
- der *Dr. Anton Oelzelt-Newinschen Stiftung* innerhalb der ÖAW für einen namhaften Druckkostenzuschuss.

Wien, 19. Februar 2016

Michael Hantel und Leopold Haimberger

Inhaltsverzeichnis

1	Das Haushaltskonzept	1
1.1	Einleitung	2
1.1.1	Das Klimasystem	5
1.1.2	Der Zustand des Klimasystems	6
1.1.3	Klimamechanismen	8
1.2	Das Ordnungsproblem der Klimatologie	10
1.2.1	Erhebung und Sammlung von Klimadaten	10
1.2.2	Qualitative Ordnung und Inventar der Klimadaten	11
1.2.3	Ordnungsprinzip Klimaklassifikation	13
1.2.4	Gliederung nach Genese der Klimate	16
1.3	Das Haushaltsprinzip	16
1.3.1	Die Kraft des Bilanzierens	17
1.3.2	Bilanzfähigkeit von Klimagrößen	20
1.3.3	Ursachen von Zustandsänderungen	21
1.3.4	Das allgemeine Haushaltsprinzip	24
1.3.5	Ein Wolkentropfenexperiment	25
1.3.6	Komponenten des Haushalts	28
1.4	Hierarchien der Haushalte	32
1.4.1	Räumliche Kopplung	34
1.4.2	Kopplung von Stoffen	34
1.5	Bemerkungen zur Terminologie und Begriffsbildung	41
2	Prototyp der Klimahaushaltsgleichung	45
2.1	Diskrete und stetige Haushalte	46
2.1.1	Punkt- (0-D-)Haushalte	46
2.1.2	Von Linien- zu Volumenhaushalten	47
2.2	Die fluiddynamische Kontinuitätsgleichung	49
2.2.1	Die FKG in einer Dimension – diskrete Formulierung	50
2.2.2	Der Weg ins Kontinuum	53
2.2.3	Die totalzeitliche Ableitung	55
2.2.4	Verallgemeinerung auf 2D	57

2.2.5	Die allgemeine FKG	60
2.3	Geofluidkoordinaten	61
2.3.1	Generalisierte Koordinaten	62
2.3.2	Sphärische Polar- plus Druckkoordinaten	62
2.4	Massenerhaltung der Geofluidе	66
2.4.1	Die hydrostatische Näherung	67
2.4.2	Die Massenkontinuitätsgleichung (MKG) der Geofluidе	68
2.4.3	Flussform der Zeitableitung	70
2.5	Prototyp der Klimahaushaltsgleichung	71
2.5.1	Das globale Transporttheorem	71
2.5.2	Das lokale Transporttheorem	73
2.6	Die <i>Moden</i> der Klimaformel	74
2.6.1	Der diagnostische Modus	75
2.6.2	Der prognostische Modus	76
2.6.3	Der Modus der modernen Datenanalyse	77
3	Von Messungen über Analysen zu Haushalten	79
3.1	Einige Grundbegriffe der Statistik	80
3.1.1	Prozesse	80
3.1.2	Ereignisse und deren Wahrscheinlichkeiten	81
3.1.3	Zufallsvariable und Verteilungsfunktionen	86
3.1.4	Bivariate Zufallsvariablen	90
3.1.5	Erwartungswerte	93
3.1.6	Stichproben und Schätzwerte	95
3.1.7	Maximum-Likelihood-Schätzer (MLE)	98
3.2	Stochastische Prozesse	101
3.2.1	Autoregressive Prozesse	101
3.2.2	Bayes-Schätzer und dynamische Datenassimilation	106
3.2.3	Assimilation mit einem Energiebilanzmodell	108
3.2.4	Interpretation des analysierten Klimazustands	114
3.2.5	Anwendung auf eine Klimabox	117
3.3	Berechnen von Haushaltsgrößen aus dem Klimazustandsvektor	120
3.3.1	Auswertung des atmosphärischen Massenhaushalts	121
3.3.2	Horizontale Feuchtetransportdivergenz	124
3.3.3	Vertikale Feuchtstromdivergenz und Feuchtetendenz	125
3.3.4	Variationelle Anpassung überbestimmter Haushalte	126
3.3.5	Die Bestimmung subskaliger Flüsse im Inneren der Atmosphäre	128
3.4	Zeitreihenanalyse	129
3.4.1	Homogenität von Zeitreihen	131
3.4.2	Trendanalyse	133
3.4.3	Korrelationsanalyse	134
3.4.4	Signifikanz	136
3.4.5	Bivariate Analyse von Zeitreihen	137
3.5	Raumzeitliche Analyse	138

- 4 Der Massenhaushalt der Geofluide** 145
 - 4.1 Darstellung des Massenhaushalts 146
 - 4.1.1 Ausdehnungsloser Massenhaushalt 146
 - 4.1.2 Die Klimasäule 147
 - 4.2 Massenhaushalt der Atmosphäre 151
 - 4.2.1 Die Säulenmasse 151
 - 4.2.2 Der Horizontaltransport 153
 - 4.2.3 Zonale Mittelung und Stromfunktion 155
 - 4.3 Massenhaushalt des Ozeans 157
 - 4.4 Grenzen der hydrostatischen Näherung 159

- 5 Der globale Impulshaushalt** 161
 - 5.1 Die allgemeine Zirkulation 162
 - 5.2 Der Impulshaushalt 166
 - 5.2.1 Das Newtonsche Kraftgesetz 167
 - 5.2.2 Die wirkenden Kräfte 168
 - 5.2.3 Hydrostatische Bewegungsgleichungen 169
 - 5.2.4 Die Scheinreibung 171
 - 5.2.5 Die zeitlich gemittelten Bewegungsgleichungen 175
 - 5.2.6 Windschub und Bergdrehmoment 177
 - 5.3 Das globale Windfeld 179
 - 5.3.1 Der geostrophische Wind 179
 - 5.3.2 Das mittlere zonale Windfeld 181
 - 5.3.3 Der Strahlstrom 182
 - 5.4 Der Drehimpulshaushalt 183
 - 5.4.1 Impuls und Drehimpuls 183
 - 5.4.2 Vertikaler Drehimpulsstrom 186
 - 5.4.3 Horizontaler Drehimpulsstrom 187
 - 5.4.4 Drehimpulshaushalt im zonalen Mittel 189
 - 5.4.5 Das ozeanische Strömungssystem 191
 - 5.5 Zusammenschau: Globaler Impulskreislauf 191

- 6 Der globale Energiezyklus** 193
 - 6.1 Der Strahlungshaushalt des Planeten 194
 - 6.1.1 Strahlungsfluss und Strahlungsstrom 195
 - 6.1.2 Solare und terrestrische Strahlung 198
 - 6.1.3 Der 0D-Strahlungshaushalt 202
 - 6.1.4 Das Strahlungsfeld am Oberrand der Atmosphäre 205
 - 6.1.5 Der Treibhauseffekt 213
 - 6.1.6 Das Strahlungsfeld an der Erdoberfläche 217
 - 6.1.7 Die Strahlungsstromdivergenz 220
 - 6.2 Theorie des 3D-Energiehaushalts 223
 - 6.2.1 Thermodynamische Grundbegriffe 224
 - 6.2.2 Die Energiegleichung für Geofluide 225
 - 6.2.3 Die mittlere Energiegleichung für die Atmosphäre 229

6.2.4	Die mittlere Energiegleichung für den Ozean	233
6.3	Vertikale Energieströme im Klimasystem	233
6.3.1	Strahlungs-konvektives Gleichgewicht	234
6.3.2	Vertikale Energieströme an der Erdoberfläche	239
6.3.3	Vertikale Energiestromdivergenz in den Klimafluiden	242
6.4	Horizontale Energietransporte im Klimasystem	244
6.4.1	Notwendiger meridionaler Energietransport	244
6.4.2	Beobachteter horizontaler Energietransport	247
6.5	Der Haushalt der verfügbaren potentiellen Energie	250
6.5.1	Verfügbare potenzielle Energie im Schwimmbecken	251
6.5.2	Die verfügbare potenzielle Energie der Atmosphäre	256
6.5.3	Der Lorenzsche Energiezyklus	257
6.6	Variabilität des Energiehaushalts	262
6.6.1	Die Energiegleichung für das Weltmeer	262
6.6.2	Globale Variabilität	264
6.6.3	Regionale Variabilität	267
6.7	Zusammenschau: Globaler Energiekreislauf	271
7	Der hydrologische Kreislauf	275
7.1	Komponenten des Wasserhaushalts	276
7.2	Theorie des 3D-Wasserhaushalts	280
7.2.1	Phasenflüsse: Die Umwandlungsraten des Wassers	281
7.2.2	Vertikales Integral	283
7.2.3	Meridionalprofil	284
7.2.4	Die Verweilzeit in den Wasserreservoirs	285
7.3	Wasserhaushalt der Atmosphäre	286
7.3.1	Der Wassergehalt der Atmosphäre	287
7.3.2	Wasserströme in vertikaler Richtung	289
7.3.3	Wassertransporte in horizontaler Richtung	292
7.3.4	Die Umwandlungsgrößen von Wasser	295
7.4	Wasserhaushalt des Weltmeeres	296
7.4.1	Die ozeanische Geofluidsäule	296
7.4.2	Globaler Wasserhaushalt Weltmeer/Kontinente	297
7.4.3	Haushalte großer Meeresbecken	299
7.4.4	Kopplung von Wasser- und Energiehaushalt	300
7.5	Wasser- und Energiehaushalt der Kryosphäre	301
7.5.1	Haushaltsgleichungen für Inlandeis und Meereis	302
7.5.2	Die Kryosphäre im Mittel	305
7.5.3	Die schrumpfende Kryosphäre	307
7.6	Wasser- und Energiehaushalt der Kontinente	309
7.6.1	Haushaltsgleichungen für die Landsäule	310
7.6.2	Globale Wasserhaushalte	313
7.6.3	Boxhaushalte einzelner Kontinente	315
7.6.4	Regionale und lokale Wasserhaushalte	316
7.7	Zusammenschau: Globaler Wasserkreislauf	318

8	Globale chemische Kreisläufe	321
8.1	Stöchiometrische Grundlagen	322
8.2	Stoffe im Klimasystem	326
	8.2.1 Gasförmige Bestandteile	327
	8.2.2 Partikelbestandteile	328
8.3	Der CO ₂ -Haushalt	328
	8.3.1 Speicherung von CO ₂ in der Atmosphäre	329
	8.3.2 Boxhaushalt von Kohlenstoff	332
	8.3.3 Globale Flussprofile von Kohlenstoff in horizontaler Verteilung	338
	8.3.4 Zusammenschau: Globaler Kohlenstoffkreislauf	342
8.4	Der Methanzzyklus	343
9	Partikelkreisläufe	347
9.1	Wolken	348
	9.1.1 Das Tropfenspektrum	348
	9.1.2 Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	352
	9.1.3 Wolkenwasser	354
	9.1.4 Phänomenologie der Wolken	355
9.2	Aerosole	356
	9.2.1 Aerosol-Typen	356
	9.2.2 Das Spektrum des Aerosols	357
	9.2.3 Aerosol-Umwandlungen	359
9.3	Spektrale Haushalte	361
10	Der Klimabegriff im Wandel	365
10.1	Bioide	366
10.2	Haushaltsaspekte lebender Systeme	370
10.3	Finanzhaushalt	371
10.4	Ausblick: Wie weit trägt das Haushaltskonzept?	374
11	Anhänge	377
11.1	Koordinatensysteme	377
11.2	Ausgewählte Kartendarstellungen	379
11.3	Mittelungen	381
11.4	Verwendete Datensätze	386
11.5	Quellennachweis	388
	Literaturverzeichnis	391
	Sachverzeichnis	401