

Klimatologie

Martin Kappas

Klimatologie

Klimaforschung im 21. Jahrhundert
– Herausforderung für Natur- und
Sozialwissenschaften

Autor

Prof. Dr. Martin Kappas
Geographisches Institut
Universität Göttingen
Goldschmidstr. 5
37077 Göttingen
E-Mail: mkappas@gwdg.de

Wichtiger Hinweis für den Benutzer

Der Verlag, der Herausgeber und die Autoren haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Der Verlag übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch 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 hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar gezahlt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2009
Spektrum Akademischer Verlag ist ein Imprint von Springer

09 10 11 12 13 5 4 3 2 1

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Planung und Lektorat: Frank Wigger, Martina Mechler
Redaktion: Dr. Petra Seeker
Satz: TypoStudio Tobias Schaedla, Heidelberg
Umschlaggestaltung: SpieszDesign, Neu-Ulm
Titelfotografie: © picture-alliance/Picture Press/NASA/VRS
Zeichnungen: Dr. Martin Lay, Breisach a. Rh.

ISBN 978-3-8274-1827-2

*Humanity,
long affected by earth's changing climate,
now plays an increasing role in shaping it.*

*Für
Lea und Sabine*

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen bedanken, die mich während der Entstehungsphase des Buches unterstützt haben – sei es für die vielen menschlichen und fachlichen Anregungen und Gespräche oder für die Nutzungserlaubnis der einen oder anderen Abbildung.

Insbesondere möchte ich mich bei Michael H. Glantz für die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes an der University of Colorado (Boulder) während meines erneuten Forschungssemesters im Frühjahr/Sommer 2009 bedanken; dies verschaffte mir neben anregenden Fachgesprächen die nötige Ruhe, mein Buch fertigzustellen.

Für die gesamte Erstellungsphase habe ich mich beim Team von Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg zu bedanken, das mich jederzeit kompetent und stets ansprechbereit begleitet hat. Hier sind insbesondere Herr Frank Wigger

als Planer und Frau Martina Mechler als Lektorin zu nennen. Die Zusammenarbeit mit ihnen war nicht nur lehrreich, hochgradig zielführend und kompetent, was die Bucherstellung anging, sondern hat auch jederzeit Spaß gemacht.

Weiterhin möchte ich mich bei Frau Dr. Seeker für die Durchsicht des Manuskripts sowie bei Herrn Dr. Ley für die hervorragende Umsetzung meiner Grafik- und Abbildungsvorgaben bedanken.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Frau Sabine und meiner Tochter Lea bedanken, die, wie so oft, auf viel gemeinsame Zeit verzichtet haben, um mich stets durch Schaffung einer angenehmen „Atmosphäre“ in meiner Arbeit zu unterstützen.

Boulder, Colorado, Mai 2009
Martin Kappas

Vorwort: Warum ein neues Lehrbuch zur Klimatologie?

Die Klimatologie als systematische und quantitative Wissenschaft ist eine vergleichsweise junge Disziplin. Erst im vergangenen Jahrhundert wurde die herkömmliche, beschreibende Naturwissenschaft vom Klima durch eine physikalische Klimatologie abgelöst. Energetische Umwandlungsprozesse konnten mehr und mehr physikalisch abgebildet werden und sind somit quantifizierbar geworden. Dies spiegelt sich auch in der Entwicklung der Klimamodelle von einfachen Energiebilanzmodellen bis zu dreidimensionalen gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen wider. In den letzten Jahrzehnten ist die Klimatologie zu einer globalen „Systemwissenschaft“ des Klimasystems beziehungsweise des Erdsystems als Ganzes geworden. Die Klimaforschung hat sich zu einer modernen „Mega-Science“ entwickelt, die disziplinübergreifend und extrem problemgesteuert interdisziplinäre Fragestellungen angeht und in viele Forschungs- und Lebensbereiche des Menschen eingreift. Kernproblem beziehungsweise Kernfrage ist, in welcher Weise und in welchem Ausmaß der Mensch Verursacher und gleichzeitig Betroffener eines globalen Klimawandels ist. So rückt das Wissenschaftsgebäude der Klimatologie sehr nahe an gesellschaftliche Fragestellungen heran, ob es um die ökonomischen Folgen eines Klimawandels oder um die Sensibilität von Natur und Gesellschaft gegenüber Klimaänderungen geht. Die Klimaforschung und das Phänomen des Klimawandels sind im Alltag von Gesellschaft und Politik angelangt.

Um diese gesellschaftliche und politische Relevanz zu vermitteln, ist eine Neukonzeption von Klimalehrbüchern erforderlich. Denn die reine Weitergabe von wissenschaftlichem Basiswissen und meteorologischen Gesetzen genügt nicht, um sich den Herausforderungen und gesellschaftlichen Rückkopplungen des Klimawandels zu stellen. Wir müssen über den Tellerrand der Einzel-

disziplinen blicken und zu einer in hohem Maße interdisziplinären Betrachtung unseres Erdsystems gelangen.

Es ist heute unverzichtbar, wissenschaftliche Expertise in gesellschaftliche Verhaltens- und Handlungsweisen einfließen zu lassen und für politische Entscheidungsträger verfügbar zu machen. Dazu muss die Wissenschaft aber auch zugänglicher werden und sich bemühen, komplexe Inhalte der Gesellschaft allgemein verständlich aufzubereiten. Das vorliegende Lehrbuch soll ein Beitrag dazu sein. Im neusprachlichen Gebrauch wird in diesem Zusammenhang immer häufiger der Ausdruck „Capacity Building“ oder „Capacity Development“ verwendet. Die Vereinten Nationen (UN) definieren in ihrem Entwicklungsprogramm (Development Programme, UNDP) dieses Konzept wie folgt:

„Capacity is the ability of individuals, organizations, and societies to perform functions, solve problems, and set and achieve goals. Capacity development entails the sustainable creation, utilization, and retention of that capacity in order to reduce poverty, enhance self-reliance, and improve people's lives.“

„Capacity Building“ zeigt also Möglichkeiten für Individuen, Organisationen und Gesellschaften auf, bestimmte Funktionen und Handlungsoptionen wahrzunehmen, um Probleme zu lösen und Ziele zu setzen beziehungsweise zu erreichen. „Capacity Development“ entwickelt die weitere nachhaltige Nutzung der bereits erworbenen „Capacity“, um z. B. Armut zu reduzieren, die Eigenständigkeit des Einzelnen und der Gesellschaft zu stärken und das Leben der Menschen insgesamt zu verbessern. Ich verstehe mein Buch auch als Teil des „Capacity Building“ für die Klimaforschung.

Die Motivation für dieses Werk entstand während eines Forschungssemesters im Sommer 2005

an der University of Colorado in Boulder (USA). Die interdisziplinären Zentren und Recherchemöglichkeiten am National Center for Atmospheric Research (NCAR) sowie der Austausch mit den verschiedenen „Klimaspezialisten“ dort (hier insbesondere die Zusammenarbeit mit Michael (Mickey) H. Glantz und die Beschäftigung mit seinem wissenschaftlichen Ansatz „Climate Affairs“ – sein gleichnamiges Buch erschien 2003) festigten in mir den Wunsch, ein Klimatologielehrbuch zu schreiben, in dem unsere Abhängigkeit vom Klima und die daraus resultierenden möglichen gesellschaftlichen Probleme des 21. Jahrhunderts im Mittelpunkt stehen.

Konzeption des Lehrbuchs

Konzeptionell gliedert sich das Buch in drei große Teile:

- I: Klimatologie als Wissenschaft**
- II: Klimawandel und Global Change**
- III: Wechselwirkungen: Klima – Mensch, Gesellschaft und Politik**

Diese drei Teile greifen insofern ineinander, als der Leser ausgehend von der Entwicklung des Wissenschaftsgebäudes der Klimatologie und von fundierter, wissenschaftlich gesicherter Basisinformation den Klimawandel beziehungsweise globalen Wandel selbständig nachvollziehen und weitere Aussagen dazu bewerten und kritisch reflektieren kann. Internationale und nationale Forschungsprogramme werden ebenso vorgestellt wie die zukünftige strategische Ausrichtung der Klimaforschung. Die beiden Kapitel des ersten Teiles schließen jeweils mit einer Zusammenfassung (☛ „Wichtig zu wissen“), die das zuvor ausführlich präsentierte Wissen in kompakter Form aufgreift und für den Leser überprüfbar macht.

Ein weiteres Ziel dieses Lehrbuches besteht darin, die vorherrschende Fragmentierung des Wissenschaftsgebiets der Klimatologie zu durchbrechen, um dem Studierenden einen möglichst umfassenden und dennoch komprimierten Überblick über die aktuelle Forschungslandschaft zu vermitteln. Der Leser soll zudem angeregt werden, sich in weiterführenden Quellen (vor allem im Internet)* über die Entwicklung der Klimaforschung und ihre Strukturen zu informieren. Bereits Kapitel 1 gewährt dementsprechend einen ausführlichen

Einblick in den Aufbau internationaler und nationaler Forschungsk Kooperationen im Bereich der Klimatologie. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf den vorhandenen Beobachtungssystemen; insbesondere die für Datenbeschaffung und Modellierung unseres Klimas wichtigen, zur Erd- und Atmosphärenbeobachtung eingesetzten Satellitensysteme werden hier ausführlich dargestellt.

Im zweiten Buchteil „Klimawandel und Global Change“ werden in den Kapiteln 6 und 7 mehrere Fallbeispiele erläutert, die die Verzahnung des globalen Wandels mit dem Klimasystem sowie die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf andere Systeme verdeutlichen. Hier stehen die Komplexität des Wirkungsgefüges und die gegenseitige Abhängigkeit von Rückkopplungen im Vordergrund; sie werden helfen, das Systemverständnis zu schärfen. Die Frage, was wir aus den Aussagen des 4. IPCC-Berichts lernen können (Kapitel 8), beschließt den zweiten Teil.

Im Mittelpunkt des dritten Buchteils stehen die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesellschaft und die daraus erwachsenden notwendigen Anpassungsmaßnahmen (im gesellschaftlichen und politischen Rahmen). Die Darstellungen zu Klima und Mensch (Kapitel 9), Klima und Gesellschaft (Kapitel 10) sowie Klima und Politik (Kapitel 11) sollen den Stellenwert der Klimatologie für eine nachhaltige Entwicklung unserer Gesellschaft verdeutlichen; insbesondere die Bedeutung der Forschung für die politische Entscheidungsfindung ist hier hervorzuheben. Die Vernetzung „harter“ naturwissenschaftlicher Erkenntnisse mit „weichen“ gesellschaftswissenschaftlichen beziehungsweise sozioökonomischen Fragestellungen ist mein persönliches Anliegen.

*Um die Lesbarkeit des Buchtextes nicht durch eine Vielzahl von eingefügten *Internet-Links* (mit ihren oft langen URLs) zu erschweren, sind alle Hinweise auf relevante Websites unter www.spektrum-verlag.de/978-3-38274-1827-2 kapitelweise zusammengefasst und können von dort mit einem Mausklick angesteuert werden. An den entsprechenden „Anker-Stellen“ im Buch steht ein kleines Mausymbol ☛ im Text.

Weitere Orientierungshilfen für den Leser sind ein *Glossar* wichtiger Fachbegriffe (S. 325) sowie eine Liste der zahlreichen in diesem Bereich geläufigen und im Buch verwendeten *Akronyme* (S. 335). Ein *Literaturverzeichnis* weist Quellen und weiterführende Veröffentlichungen aus (S. 319), ein ausführlicher Index erschließt den Inhalt des Werkes (S. 341). Die Farbtafeln sind zur leichteren Auffindbarkeit mit einem blauen Balken am Buchrand gekennzeichnet (S. 309).



Genau hierin liegt wohl auch der wesentliche Unterschied des vorliegenden Werkes zu bereits bestehenden, hervorragend verfassten Lehrbüchern zur Klimatologie.

Ich hoffe, dass dieses Lehrbuch dazu beiträgt, in den Köpfen der Menschen ein neues aufgeklärtes Klimabewusstsein zu entwickeln, und dass es sie dazu ermutigt, sich mit dem Phänomen Klima insgesamt, ihrem eigenen Verhalten und Handeln sowie dem gesetzten politischen und gesellschaftlichen Rahmen auseinanderzusetzen.

Boulder, Colorado, Mai 2009
Martin Kappas

Inhalt

Teil I Klimatologie als Wissenschaft

1	Klima als interdisziplinärer und internationaler Forschungsschwerpunkt 3	2.8.3	Niederschlag und Wasserkreislauf 98
1.1	Das Weltklimaprogramm 6	2.8.4	Verdunstung und Niederschlag 98
1.1.1	Das Weltklimaforschungsprogramm (WCRP) 9	2.9	Dynamik der Atmosphäre 104
1.1.2	Erdsystemforschung – die Gründung des ESSP (Earth System Science Partnership) 12	2.9.1	Wirksame Kräfte in der Atmosphäre . . . 104
1.2	Klimaerfassung – Messnetze und Beobachtungssysteme 14	2.9.2	Zyklone und Antizyklone als Beispiel der atmosphärischen Dynamik in der Westwinddrift 108
1.3	Klimadiagnose aus dem All – Globale Datensätze und zukünftiger Bedarf der Klimaforschung 21	2.10	Die allgemeine atmosphärische Zirkulation 109
1.3.1	Fernerkundung – Was ist das? 22	2.10.1	Die außertropische Westwind-Zirkulation 113
1.3.2	Satellitensysteme für die Klima- und Global-Change-Forschung 26	2.10.2	Die tropische Passat- und Monsunzirkulation 116
2	Basiswissen und Grundgesetze der Klimatologie 71	2.10.3	Die äquatoriale Zonal- oder Walker-Zirkulation 118
2.1	Zusammensetzung und Aufbau der Atmosphäre 71	2.10.4	Die Ostwindzirkulation über den Polen 119
2.2	Die Sonnenstrahlung – Energiequelle allen Lebens 74	2.11	Telekonnektionen 121
2.3	Parameter des solaren Klimas: Erdrevolution, Beleuchtungsklima und Jahreszeiten 74	2.11.1	ENSO (El Niño – Southern Oscillation) 122
2.4	Der Einfluss der Atmosphäre auf die Sonnenstrahlung 78	2.11.2	Madden-Julian-Oszillation (MJO) 136
2.5	Die Globalstrahlung 79	2.11.3	Nordatlantik-Oszillation (NAO) 137
2.6	Wärmehaushalt der Atmosphäre: fühlbarer und latenter Wärmestrom . . . 82	2.11.4	Die Arktische Oszillation (AO) 139
2.7	Der natürliche Treibhauseffekt und seine strahlungsaktiven Gase 84	2.11.5	West Pacific Pattern (WP) 140
2.8	Klimafaktoren und Klimaelemente bestimmen unser Klimasystem 86	2.11.6	Quasi-Biennial-Oszillation (QBO) 141
2.8.1	Die Ausdehnung der Luft bei Erwärmung – der Luftdruck 90	2.12	Klimate der Erde – Klimaklassifikationen 142
2.8.2	Temperaturverteilung in der Atmosphäre 91	2.12.1	Genetisch-dynamische Klimaklassifikationen 142
		2.12.2	Effektive Klimaklassifikationen 143

Teil II Klimawandel und Global Change

3	Zentrale Aussagen zum Klimawandel 153
4	Kennwerte des Klimawandels und des globalen Wandels 155
4.1	Veränderungen der atmosphärischen Kohlendioxid-, Methan- und Stickoxidkonzentrationen 159

4.1.1	Kohlendioxid	159	7.1.2	Messwerterfassung und UVI-Vorhersage	228
4.1.2	Methan	169	7.2	Fallbeispiel: Klimawandel und die afrikanische Malaria	231
4.1.3	Stickoxid	171	7.2.1	Auswirkungen von Temperaturveränderungen auf die Malariaübertragung	232
4.2	Veränderungen der atmosphärischen Halogenkohlenwasserstoffe, des troposphärischen und stratosphärischen Ozons sowie der Aerosole	173	7.2.2	Auswirkungen von Niederschlagsveränderungen auf die Malariaübertragung	232
4.2.1	Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), vollhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF ₆)	173	8	Was können wir aus dem vierten IPCC-Bericht lernen?	237
4.2.2	Troposphärisches Ozon	175	8.1	Wissenschaftliches Verständnis des Klimawandels im Hinblick auf Anpassungsmaßnahmen	238
4.2.3	Stratosphärisches Ozon	175	8.2	Offene wissenschaftliche Fragen – welcher Handlungsbedarf besteht?	239
4.2.4	Aerosole	180	8.2.1	Handlungsbedarf: Dynamik der Eisschilde der Erde	240
4.3	Sozioökonomische Entwicklung der Welt (SRES-Szenarien)	181	8.2.2	Handlungsbedarf: Veränderungen im Wasserhaushalt der Erde	240
5	Schlüsselthemen des Klimawandels	185	8.2.3	Handlungsbedarf: Atlantische Meridionalzirkulation im Ozean (AMOC)	241
5.1	Veränderungen des globalen Wasserhaushalts, der Wolkenbildung und Niederschlagsverteilung auf der Erde – der aktuelle Wissensstand	185	8.2.4	Handlungsbedarf: Methanfreisetzung	243
5.2	Klimawandel und Wasser	187	8.2.5	Handlungsbedarf: Landoberflächenprozesse, Kohlenstoffzyklus und biogeochemische Feedback-Mechanismen	243
5.3	Klimawandel und Landwirtschaft	190	8.2.6	Handlungsbedarf: Aerosol-Wolken-Interaktion und Radiative Forcing	244
5.4	Klimawandel und Desertifikation	196	8.2.7	Handlungsbedarf: Regionalisierung der Modellprojektionen – Downscaling	245
5.5	Klimawandel, Wetteranomalien und Singularitäten	200	8.2.8	Handlungsbedarf: Entwicklung von Schnittstellen zwischen Politik und Wissenschaft	245
6	Fallstudie Kryosphäre	205			
6.1	Variabilität des arktischen Klimas	205			
6.2	Die Nordatlantische und die Arktische Oszillation	206			
6.3	Arktische Stratosphäre	207			
6.4	Arktische Troposphäre	208			
6.5	Strahlungsverhältnisse in der Arktis	208			
6.6	Wolken und Niederschlag in der Arktis	209			
6.7	Aerosole in der Arktis und ihre Quellen	210			
6.8	Klimawirkung der Aerosole	211			
6.9	Arktischer Dunst (Arctic Haze)	211			
6.10	Ozon in der Arktis	212			
6.11	Der Arktische Ozean	214			
6.12	Eis in der Arktis	216			
7	Fallstudie Klima und Gesundheit	221	9	Klima und Mensch	249
7.1	Fallbeispiel: Klimawandel und Hautkrebsgefährdung	225	9.1	Klimaentwicklung und Evolution des Menschen	249
7.1.1	Einflussfaktoren auf die auf der Erde auftretende UV-Strahlung	228	9.1.1	Gattung <i>Homo</i> – Werkzeuge, Mobilität und Intelligenz	252

Teil III
Wechselwirkungen: Klima – Mensch, Gesellschaft und Politik

10	Klima und Gesellschaft	259		
10.1	Klima und Gesellschaft im Holozän . . .	259		
10.2	Klima und Gesellschaft seit der industriellen Revolution	264		
10.3	Umweltauswirkungen der Zivilisationsdynamik – der wirtschaftende Mensch	269		
11	Klima und Politik	277		
11.1	Internationale Klimapolitik	280		
11.1.1	Der UNFCCC-Prozess	281		
11.1.2	Quantifizierung klimawirksamer anthropogener Tätigkeiten für politische Entscheidungsprozesse	283		
11.1.3	Der Emissionshandel im Rahmen des Kyoto-Protokolls	285		
11.1.4	Die flexiblen Instrumente des Kyoto-Protokolls: Joint Implementation und Clean Development Mechanism	287		
11.2	Klimapolitik auf EU-Ebene	289		
11.3	Nationale Klimapolitik – Das Beispiel Deutschland	291		
11.4	Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)	293		
11.5	Global Governance – das Konzept des Handelns im politischen Mehrebenensystem	296		
11.5.1	Herausforderungen für Natur- und Sozialwissenschaften auf globaler und lokaler Ebene	297		
11.5.2	Innovationsorientierte Umweltpolitik	300		
12	Klimawandel: eine andauernde Kontroverse und Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaft	303		
	Farbtafeln	309		
	Literatur	319		
	Glossar	325		
	Akronyme	335		
	Index	341		