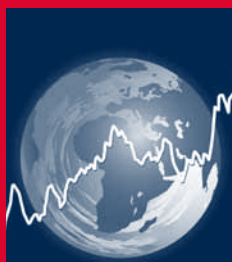


Globale Erwärmung

Mojib Latif



Profile

Ulmer

UTB



UTB 3586

Eine Arbeitsgemeinschaft der Verlage

Böhlau Verlag · Wien · Köln · Weimar

Verlag Barbara Budrich · Opladen · Farmington Hills

facultas.wuv · Wien

Wilhelm Fink · München

A. Francke Verlag · Tübingen und Basel

Haupt Verlag · Bern · Stuttgart · Wien

Julius Klinkhardt Verlagsbuchhandlung · Bad Heilbrunn

Mohr Siebeck · Tübingen

Nomos Verlagsgesellschaft · Baden-Baden

Orell Füssli Verlag · Zürich

Ernst Reinhardt Verlag · München · Basel

Ferdinand Schöningh · Paderborn · München · Wien · Zürich

Eugen Ulmer Verlag · Stuttgart

UVK Verlagsgesellschaft · Konstanz, mit UVK / Lucius · München

Vandenhoeck & Ruprecht · Göttingen · Oakville

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

Mojib Latif

Globale Erwärmung

14 Abbildungen

Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Zum Autor:

Prof. Dr. Mojib Latif ist Leiter des Forschungsbereichs Ozeanzirkulation und Klimadynamik am Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. Er ist Mitautor der letzten beiden Berichte des „Weltklimarates“ (IPPC). Ausgezeichnet wurde er u.a. mit der Sverdrup Gold Medal der American Meteorological Society, dem Max-Planck Preis für Öffentliche Wissenschaft und dem DHU-Umwelt-Medienpreis in der Kategorie „Lebenswerk“ der Deutschen Umwelthilfe. Er ist in zahlreichen wissenschaftlichen und politischen Gremien aktiv und Autor zahlreicher Veröffentlichungen.

Die Zeichnungen dieses Buches fertigte Helmut Flubacher nach Vorlagen der Literatur und des Autors an.

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.

ISBN 978-3-8252-3586-4 (UTB)

ISBN 978-3-8001-2942-3 (Ulmer)

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.

© 2012 Eugen Ulmer KG

Wollgrasweg 41, 70599 Stuttgart (Hohenheim)

E-Mail: info@ulmer.de

Internet: www.ulmer.de

Umschlagentwurf: Atelier Reichert, Stuttgart

Lektorat: Helen Haas

Herstellung: Jürgen Sprengel

Satz: Arnold & Domnick, Leipzig

Druck und Bindung: Graphischer Großbetrieb Friedr. Pustet, Regensburg

Printed in Germany

ISBN 978-3-8252-3586-4 (UTB-Bestellnummer)

Inhalt

1	Einführung	6
2	Klima ist nicht Wetter	19
3	Empfindliches Treibhausklima	29
4	Blick in die Vergangenheit	43
5	Das Klima schwankt	50
6	Wichtige Klimamoden	64
7	Es wird warm	88
8	Was muss geschehen?	110

Service

Sach- und Personenregister	118
----------------------------	-----

Einführung

„Die Menschen führen momentan ein großangelegtes geophysikalisches Experiment aus, das so weder in der Vergangenheit hätte passieren können noch in der Zukunft wiederholt werden kann“, Roger Revelle (New York Times, 1957)

Mit dem obigen Zitat hatte Roger Revelle vom kalifornischen Scripps Institution of Oceanography schon vor über fünfzig Jahren die ungeheure Dimension der Beeinflussung des Erdsystems durch den Menschen beschrieben. Dabei bezog er sich auf den Ausstoß von Kohlendioxid (CO_2), der sich infolge der weltwirtschaftlichen Entwicklung nach dem Zweiten Weltkrieg rasant beschleunigt hatte. Revelle und sein Kollege Charles D. Keeling waren ihrer Zeit weit voraus. Zwei Pioniere der Klimaforschung. Nicht zuletzt deren Weitsicht haben wir es zu verdanken, dass es heute belastbare Informationen über die Entwicklung des Kohlendioxids während der letzten Jahrzehnte gibt. Keelings seit 1958 vorliegende Kohlendioxidmessungen auf Hawaii widerlegten die Annahme, dass Pflanzen und Meere das Kohlendioxid vollständig aufnehmen würden. Seine inzwischen von vielen Wissenschaftlern als die wichtigsten Umweltdaten des 20. Jahrhunderts bezeichneten Messungen belegen, dass sich der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre nicht nur mit den Jahreszeiten ändert, sondern auch, dass die Kohlendioxidkonzentration der Luft über die Jahrzehnte hinweg gestiegen ist (Abb. 1).

Kohlendioxid ist ein Treibhausgas und es gilt heute als das Gas, das hauptsächlich für die globale Erwärmung verantwortlich ist. Diese findet offensichtlich statt (Abb. 1). Das Problem der globalen Erwärmung ist längst nicht mehr allein ein Thema der Wissenschaft, sondern es steht inzwischen auch im Blickpunkt des öffentlichen Interesses und ganz oben auf der weltpolitischen Agenda. Der Begriff „globale Erwärmung“ ist allerdings nicht scharf definiert. Mit dem Begriff ist oftmals die menschliche (anthropogene) Beeinflussung des Klimas insgesamt gemeint, zu der auch das Ozonproblem gehört. Darüber hinaus ist der Begriff „globale

Erwärmung“ etwas irreführend, weil die Temperatur nicht notwendigerweise an jedem Ort der Erde steigen muss. Beispielsweise würde eine durch den Temperaturanstieg verursachte massive Abschwächung des Golfstroms der Erwärmung des Nordatlantiks entgegenwirken, sodass die dortige Meeresoberflächentemperatur sogar leicht fallen könnte. Das Phänomen der globalen Erwärmung ist aus diesem Grund als Erwärmung der Erdoberfläche im weltweiten Durchschnitt zu verstehen.

Die wichtigste Ursache der globalen Erwärmung ist der anthropogen verursachte Anstieg der Treibhausgase, allen voran Kohlendioxid. Die Abb. 1 legt diesen Sachverhalt bereits nahe. Das zeigen außerdem zahlreiche wissenschaftliche Studien. Die Ursache des Kohlendioxidanstiegs liefert die Isotopenanalyse. Isotope sind Atome eines Elements, die sich durch eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen im Atomkern unterscheiden und damit unterschiedlich schwer sind. Das Kohlenstoffatom (C) kommt hauptsächlich in Form zweier Isotope vor: Überwiegend als ^{12}C und in deutlich kleineren Mengen als ^{13}C . Fossile Brennstoffe haben ein niedrigeres Verhältnis $^{13}C / ^{12}C$ als Kohlendioxid in der Atmosphäre. Das Verhältnis $^{13}C / ^{12}C$ der Luft ist in dem Maße gesunken wie die anthropogenen Kohlendioxidemissionen wuchsen und es entlarvt so die Verbrennung der fossilen Brennstoffe als Grund für den steigenden Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre während der letzten Jahrzehnte.

Der Zusammenhang zwischen den Treibhausgaskonzentrationen und der Temperatur ist uns seit über hundert Jahren bekannt. Treibhausgase verursachen den irdischen Treibhauseffekt und wärmen dadurch die Erdoberfläche. Da der Anteil der Treibhausgase in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung stetig steigt, muss es zu einer globalen Erwärmung kommen. Während die Kohlendioxidkonzentration zu Beginn der Industrialisierung noch 280 ppm (engl.: parts per million, Teile pro einer Million) betragen hat, maß sie 2010 schon ungefähr 390 ppm (Abb. 1). Der größte Zuwachs mit etwa 80 ppm erfolgte nach dem Zweiten Weltkrieg. Dabei ist der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre vor Beginn der instrumentellen Messungen im Jahr 1958 indirekt mit Hilfe von Eisbohrungen mittels der Analyse der eingeschlossenen Luftbläschen ermittelt worden.

An folgenden Aussagen gibt es keinen Zweifel:

- Der Anstieg des Kohlendioxids seit dem Beginn der Industrialisierung ist anthropogener Natur, natürliche Quellen scheiden als Ursache aus. Er ist in erster Linie eine Folge der Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Energiegewinnung und zu einem geringeren Teil Folge der Brandrodungen der tropischen Regenwälder.

- Die heutige Kohlendioxidkonzentration ist einmalig in der Rückschau der letzten 800 000 Jahre.
- Die oberflächennahe Temperatur der Erde zeigt im weltweiten Durchschnitt einen offensichtlichen Erwärmungstrend während des 20. Jahrhunderts, wobei sich die Erwärmungsrate während der zweiten Hälfte gegenüber der Rate der ersten Hälfte beschleunigt hat.
- Der Temperaturanstieg hat Folgen: Die Schnee- und Eisflächen der Erde haben sich über die Jahrzehnte zurückgezogen und der Meeresspiegel ist gestiegen. Beides sind von der Temperatur unabhängige Indizien der Erderwärmung.
- Wegen der Trägheit des Klimas wird sich der allmähliche Erwärmungstrend in den kommenden Jahrzehnten fortsetzen.

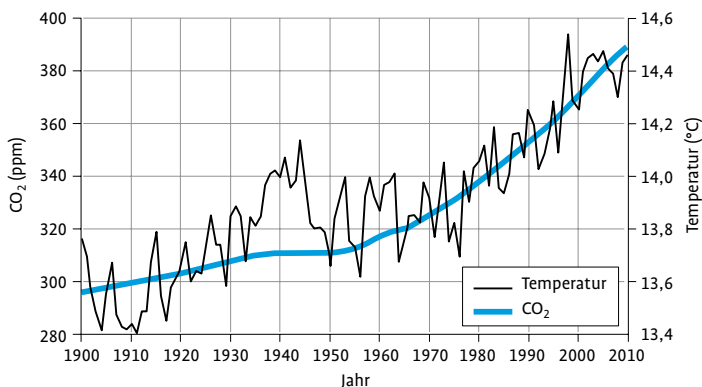


Abb. 1: Die Entwicklung des Kohlendioxids (CO_2) in der Luft und der global gemittelten oberflächennahen Temperatur seit 1900. Letztere definiert man anhand der Meeresoberflächentemperatur und der Temperatur in 2 Meter Höhe über Land.

Allerdings hat sich die Temperatur nicht so glatt entwickelt wie das Kohlendioxid. Sie zeigt neben dem langfristigen Anstieg ausgeprägte Schwankungen. Das Klimasystem unterliegt vielfältigen internen und externen natürlichen Einflüssen, woraus sich die irreguläre Entwicklung erklärt. Interne Schwankungen werden vom Klimasystem selbst erzeugt, etwa durch Änderungen der Winde oder Meeresströmungen. Externe benötigen einen äußeren Antrieb wie Vulkanausbrüche und eine damit im Zusammenhang stehende Schwächung der Sonnenstrahlung. Eine stetige Klimaentwicklung kann es daher prinzipiell nicht geben. Wir können wegen der großen natürlichen Schwankungsbreite des Klimas

auch nicht erwarten, dass es infolge des anthropogenen Einflusses jedes Jahr neue Temperaturrekorde zu verzeichnen gibt. Aus diesem Grund sind Aussagen über den menschlichen Anteil an der Klimaentwicklung auf der Basis nur weniger Jahre im höchsten Maße unsicher.

Bei der Betrachtung des anthropogenen Klimawandels muss man sehr viele Faktoren berücksichtigen. Die bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehenden Schwefelaerosole beispielsweise dämpfen die Erwärmung etwas, da diese die Sonnenstrahlung behindern. In diesem Buch werden wir unter dem Begriff „globale Erwärmung“ tatsächlich nur die Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre durch den anthropogenen Ausstoß von Treibhausgasen verstehen. Sie ist das Hauptsignal hinsichtlich der anthropogenen Klimabeeinflussung. Das Buch möchte die Grundlage dafür liefern, das Problem der globalen Erwärmung differenziert betrachten und die vielen in der Öffentlichkeit diskutierten Argumente für und gegen eine anthropogene Klimaerwärmung besser einzuschätzen zu können. Es kann sich hier zwangsläufig nur um einen kleinen Ausschnitt aus der Klimaforschung handeln, denn sie entwickelt sich sehr schnell, und es werden immer mehr Wissensbereiche in sie mit einbezogen. Viele Aspekte werden in diesem Buch nicht behandelt. Einige finden sich in meinem Lehrbuch „Klimawandel und Klimadynamik“, das im Jahr 2009 in der UTB erschienen ist.

Von der Klima- zur Erdsystemforschung

Bis vor einigen Jahren gab es die Klimawissenschaft als eigenständiges Studienfach noch gar nicht. Daraus erklärt sich, dass es einen berufsqualifizierenden Abschluss als Klimawissenschaftler oder -forscher zumindest in Deutschland bisher nicht gegeben hat. Die meisten in der Klimaforschung tätigen Wissenschaftler haben Meteorologie, Ozeanographie oder Geophysik studiert. Alle drei sind Fächer der angewandten Physik, die klimarelevante Inhalte vermitteln. Dazu kommen Seiteneinsteiger aus der Physik, der Mathematik oder aus anderen naturwissenschaftlichen Fächern wie etwa der Chemie oder der Biologie. Insbesondere auch das Studium der Geologie ermöglicht den Einstieg in die Klimaforschung, wobei sich Geologen häufig mit der Klimageschichte, dem Paläoklima, befassen. In vielen Forschungsinstituten findet sich eine bunte Mischung von Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen.

Um der wachsenden Bedeutung des Themas Klima innerhalb der Gesellschaft Rechnung zu tragen, entstehen an vielen Universitäten

neue integrative Studiengänge. Die neuen Curricula sind interdisziplinär ausgerichtet und vermitteln neben den Inhalten aus den klassischen Fächern Mathematik, Physik, Meteorologie, Ozeanographie und Geophysik Stoffe aus der Biologie, der Chemie und teilweise auch aus den Wirtschaftswissenschaften. Darüber hinaus findet eine Entwicklung zu einer stark integrativen Forschung in vielen Netzwerken statt, an denen sich zunehmend außeruniversitäre Einrichtungen beteiligen. Schließlich stimuliert die gegenwärtige Forschungsförderung die Tendenz zu einer mehr interdisziplinären Wissenschaft.

Diese Entwicklung reflektiert den Übergang der Klimaforschung mit ihren weitgehend physikalischen Inhalten zu einer Erdsystemforschung mit zunehmend biogeochemischen Inhalten und der Einbeziehung weiterer neuer Wissensgebiete. Das Problem der globalen Erwärmung erfordert eine fachübergreifende Zusammenarbeit, um mögliche Auswirkungen zu berechnen und um Anpassungs- und Vermeidungsstrategien zu entwickeln. Diese Notwendigkeit äußert sich auch darin, dass der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), bekannt als „Weltklimarat“, die folgenden drei Arbeitsgruppen unterhält:

- Die Arbeitsgruppe 1 „Wissenschaftliche Grundlagen“ befasst sich mit den Aspekten des physikalischen Wissens zur Klimaänderung, die für politische Entscheidungsträger als am sachdienlichsten eingeschätzt werden.
- Die Arbeitsgruppe 2 „Auswirkungen, Anpassung und Verwundbarkeit“ konzentriert sich auf die Folgen für die Umwelt sowie die sozialen und ökonomischen Konsequenzen der Klimaänderung und mögliche Anpassungsmaßnahmen.
- Die Arbeitsgruppe 3 „Verminderung des Klimawandels“ befasst sich mit kurz- und langfristigem Klimaschutz in den Sektoren Energie, Verkehr, Gebäude, Industrie, Land- und Forstwirtschaft und Abfall, mit den Zusammenhängen zwischen Klimaschutz und nachhaltiger Entwicklung sowie mit politischen Anstrengungen, Maßnahmen und Instrumenten für den Klimaschutz.

Wir werden uns hier vor allem mit den wissenschaftlichen Grundlagen beschäftigen, also in erster Linie mit der Physik des Klimawandels. Der anthropogene Ausstoß von Treibhausgasen führt neben der globalen Erwärmung zu Änderungen der Winde und der Meeresströmungen. Daneben schmilzt das Eis der Erde, das u. a. in Form kontinentaler Eisschilde, von Gebirgsgletschern, als Packeis oder Schnee vorkommt. All diese Vorgänge folgen den physikalischen Grundgesetzen, die bekannt sind und

mit Hilfe der Sprache der Mathematik ausdrückt werden. Die zeitliche Entwicklung der physikalischen Größen ist an jedem Ort durch einen Satz gekoppelter partieller Differentialgleichungen gegeben. Zu deren Lösung muss man die entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen spezifizieren. Die Gleichungen sind sehr komplex und in hohem Maße nichtlinear, sodass man sie nur näherungsweise mit Methoden der numerischen Mathematik und mit Hochleistungscomputern lösen kann. Als Klimamodell bezeichnen wir das entsprechende Computerprogramm. Die numerische Lösung ist per Definition nicht exakt und führt zu Fehlern. Man benötigt enorme Rechnerressourcen, um die Fehler möglichst klein zu halten. Daher gibt es in der Klimaforschung immer mehr Berührungspunkte mit Fächern wie der Informatik und dem wissenschaftlichen Rechnen.

Die Erforschung der Ursachen und Auswirkungen der globalen Erwärmung erfordert die enge Zusammenarbeit zahlreicher Wissenschaftsdisziplinen. Ein Beispiel: Nicht das gesamte Kohlendioxid, das wir Menschen in die Atmosphäre entlassen, verweilt dort für sehr lange Zeit. Die Meere und auch die Pflanzen nehmen einen beträchtlichen Teil des von uns emittierten Kohlendioxids auf. So haben die Meere etwa die Hälfte des seit dem Beginn der Industrialisierung durch die Verbrennung der fossilen Brennstoffe in die Atmosphäre entlassenen Kohlendioxids aufgenommen. Wir müssen uns daher zwangsläufig mit den biogeochemischen Stoffkreisläufen befassen, in diesem Beispiel mit dem Kohlenstoffkreislauf. Er bestimmt den Gehalt von Kohlendioxid in der Atmosphäre und letztlich mit darüber, wie stark die globale Erwärmung ausfällt. Entsprechende Überlegungen gelten für die Treibhausgase Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) und deren Kreisläufe. Neben den physikalischen Prozessen werden aus diesem Grund in den heutigen Klimamodellen zunehmend die biogeochemischen Wechselwirkungen einbezogen. Die erweiterten Modelle werden als Erdsystemmodelle bezeichnet.

Die Stoffkreisläufe sind jedoch nur unzureichend verstanden. Es existieren im Gegensatz zu den physikalischen Vorgängen oftmals keine allgemeingültigen Gesetze, welche die biogeochemischen Vorgänge beschreiben und in Form mathematischer Gleichungen in die Modelle eingefügt werden könnten. Unsere Wissenslücken hinsichtlich der biogeochemischen Kreisläufe sind zum Teil auch darin begründet, dass viele Prozesse sehr kleinräumiger Natur sind und ihre Bedeutung erst jüngst erkannt worden ist. Daraus erklärt sich das Aufkommen ganz neuer Forschungsfelder im Bereich der Klima- und Erdsystemwissenschaften wie etwa das der biologischen Ozeanographie oder der Mikro-

biologie, die sich unter anderem mit Vorgängen auf der planktonischen oder sogar der noch kleineren Zellskala befassen. Bestimmte Bakterienarten beispielsweise können im Meer gelösten Stickstoff aufnehmen und als eine Art Dünger für Plankton wirken. Plankton ist ein wichtiges Glied in der Nahrungskette und damit auch wichtig für den Stickstoff- und Kohlenstoffkreislauf.

Betrachten wir die marine Komponente des Kohlenstoffkreislaufs etwas genauer, um die komplizierte Wechselwirkung mit dem physikalischen System und die Notwendigkeit der Einbeziehung dieser Rückkopplung zu verstehen. Die globale Erwärmung ändert die Löslichkeit des Meerwassers für Gase: Je wärmer das Wasser, umso geringer die Löslichkeit. Die Aufnahmefähigkeit für Kohlendioxid nimmt mit der Erwärmung ab. Die Kohlendioxidaufnahme durch die Meere führt andererseits zu ihrer Versauerung, eine Belastung für die Ökosysteme. Die Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre erfolgt sowohl auf chemischem als auch biologischem Wege. Die chemische wie auch die biologische „Kohlendioxidpumpe“ werden nach heutigem Kenntnisstand im Laufe der Zeit infolge der Erwärmung und Versauerung an Effektivität verlieren, sodass ein größerer Anteil der Kohlendioxidemissionen in der Atmosphäre verbleiben wird. Dadurch würde sich die globale Erwärmung beschleunigen.

Ähnliche Überlegungen gelten für die Landkomponente des Kohlenstoffkreislaufs. Die Klima-Kohlenstoff Wechselwirkung verdeutlicht die komplexen Vorgänge im Erdsystem. Sie ist nur ein Beispiel für das Zusammenspiel zwischen den physikalischen und den biogeochemischen Prozessen, deren Berücksichtigung unerlässlich für das Verständnis des Klimas der Zukunft und der Vergangenheit ist. Folgerichtig verändert sich die Klimaforschung immer mehr in die Richtung einer interdisziplinären Forschung, was sich schließlich in dem heutigen Lehrangebot an den Hochschulen widerspiegelt.

Weitere relativ neue Forschungsfelder sind: die mögliche Destabilisierung der in begrenzten Gebieten an den Kontinentalabhängigen vorkommenden gefrorenen Methanvorkommen (Methanhydrate) infolge der globalen Erwärmung, was zu einer beschleunigten globalen Erwärmung einerseits und zu einer zunehmenden Versauerung in diesen Gebieten andererseits führen könnte. Ein anderes sehr wichtiges Beispiel der anthropogenen Klimabeeinflussung ist die Zerstörung der als UV-Filter wirkenden stratosphärischen Ozonschicht in der mittleren Atmosphäre durch die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). Infolge des Ausstoßes von Kohlendioxid kühlt sich die Stratosphäre ab, während