

Unverkäufliche Leseprobe



Wolfgang Behringer
Kulturgeschichte des Klimas
Von der Eiszeit bis zur globalen Erwärmung

2026. 352 S., mit 44 Abbildungen
ISBN 978-3-406-84487-4

Weitere Informationen finden Sie hier:
<https://www.chbeck.de/40079195>

C·H·Beck

PAPERBACK

Alle sprechen vom Wetter: Darüber, wie es werden wird, gibt es derzeit mehr Voraussagen als je zuvor. Aber was wissen wir über Klimaschwankungen vor 500, vor 5000 Jahren? Wolfgang Behringer führt uns ein in die historische Forschung zur Klimaentwicklung. Er zeigt uns, was heute als gesichertes Wissen gelten kann, welche Klimaschwankungen es gab und wie sie das Fortkommen des Homo sapiens behinderten oder beförderten. Sein spannendes Buch führt uns plastisch vor Augen, mit welchen Schwierigkeiten, manchmal aber auch mit welch außergewöhnlich angenehmen Wetterepochen unsere Vorfahren etwa in der Staufer-Zeit konfrontiert waren und wie sie damit umgingen. Das lehrt uns nicht zuletzt Mut zu fassen, den Klimawandel als die Herausforderung unserer Generation zu begreifen und in einem besseren Sinne zu beeinflussen.

Wolfgang Behringer ist Professor em. für Geschichte der Frühen Neuzeit an der Universität des Saarlandes. Bei C.H.Beck sind von ihm u. a. erschienen: *Hexen. Glaube, Verfolgung, Vermarktung* (C.H.Beck Wissen, ⁸2024), *Tambora und das Jahr ohne Sommer. Wie ein Vulkan die Welt in die Krise stürzte* (⁵2018) und *Der große Aufbruch. Globalgeschichte der Frühen Neuzeit* (²2026).

Wolfgang Behringer

***Kulturgeschichte
des Klimas***

Von der Eiszeit bis zur globalen Erwärmung

C.H. Beck

Mit 44 Abbildungen

Dieses Buch erschien zuerst 2007 in gebundener Form im Verlag C.H.Beck.

2., durchgesehene Auflage 2007

3., unveränderte Auflage 2008

4., durchgesehene Auflage 2009

5., aktualisierte Auflage 2010

6., durchgesehene Auflage 2022

1. Auflage in C.H.Beck Paperback. 2026

© Verlag C.H.Beck GmbH & Co. KG, München 2007

Wilhelmstraße 9, 80801 München, info@beck.de

Alle urheberrechtlichen Nutzungsrechte bleiben vorbehalten.

Der Verlag behält sich auch das Recht vor, Vervielfältigungen dieses Werks zum Zwecke des Text and Data Mining vorzunehmen.

www.chbeck.de

Umschlaggestaltung: Atelier 59, München

Umschlagabbildung: Pieter Brueghel d. Ä., *Die Heimkehr der Jäger*. 1565.

Kunsthistorisches Museum Wien, © akg-images

Gesetzt aus der Aldus und der Thesis bei Janß GmbH, Pfungstadt

Druck und Bindung: Druckerei C.H.Beck, Nördlingen

Printed in Germany

ISBN 978 3 406 84487 4

www.chbeck.de/nachhaltig

produktsicherheit.beck.de

Inhalt

Vorwort zur Neuauflage | 7

Einleitung | 9

Was wissen wir über das Klima | 17

Quellen zur Klimageschichte | 19

Ursachen von Klimawandel | 27

Das Paläoklima seit Entstehung der Erde | 33

Globale Erwärmung: Das Holozän | 47

Kinder der Eiszeit | 49

Globale Erwärmung und Zivilisation | 59

Vom Optimum der Römerzeit zur Mittelalterlichen Warmzeit | 86

Globale Abkühlung: Die Kleine Eiszeit | 117

Das Konzept «Kleine Eiszeit» | 119

Veränderung der Umwelt | 123

Tanz des Todes | 142

Winter-Blues | 156

Kulturelle Konsequenzen der Kleinen Eiszeit | 163

Der zürnende Gott | 165

Die Sündenökonomie als Motor der Veränderung | 180

Die kühle Sonne der Vernunft | 196

Globale Erwärmung: Die Moderne Warmzeit | 223

Die scheinbare Abkoppelung von den Kräften der Natur | 225

Die Entdeckung der Globalen Erwärmung | 243

Reaktionen auf den Klimawandel | 254

Umweltsünden und Treibhausklima: Ein Epilog | 273

Anhang | 289

Anmerkungen | 290

Literaturauswahl | 327

Bildnachweis | 330

Register | 333

Vorwort zur Neuauflage

Bußprediger machten die Sünden der Menschen für die Klimakapriolen der *Kleinen Eiszeit* verantwortlich. Eine sofortige Veränderung ihres Verhaltens sollte den Zorn Gottes besänftigen und Besserung herbeiführen. Doch das Wetter besserte sich auch nicht mit der Verfolgung von Sündenböcken.

Umweltsünden werden heute die Verfehlungen genannt, die den *anthropogenen Klimawandel* herbeiführen. Doch wird eine sofortige Verhaltensänderung oder die Suche nach Sündenböcken den Klimawandel aufhalten? Die Antwort lautet: Nein.

Wie besorgte Klimaforscher heute feststellen, genügt die wissenschaftliche Analyse allein nicht zur Lösung der Probleme. Die Durchsetzbarkeit von Lösungen hängt von ihrer Vereinbarkeit mit kulturellen Vorstellungen und Zeittendenzen ab. Um dies verstehen zu können, brauchen wir außer einer reinen Klimageschichte auch eine *Kulturgeschichte des Klimas*.¹

Gegenstand dieses Buches sind die kulturellen Reaktionen auf Klimawandel. Dazu unternehmen wir eine kleine Zeitreise in die Erdgeschichte, um der natürlichen Wandelbarkeit des Klimas auf die Spur zu kommen. In einem zweiten Schritt betrachten wir die Reaktionen von Kultur und Gesellschaft darauf.

Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der einzigen Klimakrise, die gut aus den Quellen rekonstruierbar ist. Am Beispiel der Kleinen Eiszeit können wir sehen, welche Antworten auf diese Klimakrise gefunden wurden und wie sie mit unseren heutigen Problemen zusammenhängen. Die Kleine Eiszeit können wir als Testlauf für die *Globale Erwärmung* betrachten. Wir lernen daraus, dass bereits geringe Veränderungen des Klimas zu enormen sozialen, politischen und religiösen Erschütterungen führen.

Am Beispiel der Kleinen Eiszeit kann man beobachten, in welcher Form eine bedrohliche Klimakrise gemeistert werden konnte: indem die Verantwortlichen aufhörten, sie mit festen Glaubenssätzen zu be-

trachten und nach moralisch Schuldigen, Sündern oder Sündenböcken zu suchen. Die Lösungen sahen anders aus, als man zu Beginn der Krise gedacht hatte. Für uns nicht unbedeutend: Sie führten in die Welt, die wir kennen, die «moderne» Welt nach den Umwälzungen im Kommunikationswesen, in den Wissenschaften, in der agrarischen und industriellen Produktion. Die Welt ging nicht zugrunde, sondern eine flexible kulturelle Reaktion eröffnete sogar eine nachhaltige Verbesserung der Lebensbedingungen.

In der gegenwärtigen Situation treten Klimaforscher als Propheten kommender Katastrophen auf. Wir sind ihnen dankbar, dass sie auf die Globale Erwärmung hinweisen. Aber wir behalten in Erinnerung, dass sie lange vor einer Globalen Abkühlung gewarnt und zu Maßnahmen geraten haben, die uns heute absurd erscheinen. Politiker sollten sich keine Illusionen über die Präzision von Vorhersagen machen. Was heute wahr scheint, ist morgen Schnee von gestern.

Die Globale Erwärmung ist eine ernste Herausforderung. Die Weltklimakonferenzen setzen sinnvolle Standards. In der öffentlichen Diskussion könnte man sich aber einen kreativeren Umgang mit dem Klimawandel vorstellen. Dass die gegenwärtige Erwärmung nicht nur Gefahren, sondern auch Möglichkeiten birgt, wird bisher kaum gesehen. Die Kulturgeschichte des Klimas kann hier als Anregung dienen.

Die fortlaufende Serie von Klimakonferenzen des Weltklimarates (IPCC) und anderer Institutionen zeigt, dass die Herausforderung des Klimawandels, die der Anlass zum Schreiben dieses Buches war, nicht an Aktualität verloren hat. Entsprechend bleibt das Buch von Interesse. Seine Besonderheit besteht darin, dass nicht nur die naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels interdisziplinär erläutert, sondern auch die kulturellen Reaktionen darauf anhand der neuesten Forschungsliteratur dargestellt werden.

Wolfgang Behringer

Einleitung

Ausgangspunkt unserer Untersuchungen ist ein dreigeteiltes Diagramm aus dem ersten Bericht des *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC) aus dem Jahr 1990. Es zeigt sehr schön die Wandelbarkeit des Klimas in der letzten Million Jahre. Das oberste Diagramm zeigt den Temperaturverlauf während des Eiszeitalters: Die wenigen kurzen *Interglaziale*, in denen es wärmer war als heute, erscheinen als kostbare Ausnahme und suggerieren die Verletzlichkeit unserer Modernen Warmzeit. Die gestrichelte Linie repräsentiert den Mittelwert der *Normalperiode* von 1961–1990. Das mittlere Diagramm zeigt die geringeren Temperaturschwankungen während der letzten 10 000 Jahre, also nach dem Ende der letzten großen Kaltzeit. Das klimatische Optimum lag demnach vor etwa fünf- bis sechstausend Jahren, das entspricht dem 4. Jahrtausend vor Christus. Das unterste Diagramm zeigt den Temperaturverlauf der letzten 1000 Jahre. Wir sehen darauf das hochmittelalterliche Optimum in Kontrast zur *Kleinen Eiszeit* sowie nach 1900 Anzeichen einer neuen Erwärmung, die aber bis 1990 bei weitem nicht den Wert des Hochmittelalters, geschweige denn den des Temperaturmaximums des Holozäns, erreicht.

Für viele Betrachter war dieses Szenario verwirrend genug, denn nach Jahrzehnten, in denen viele von einer grundsätzlichen Stabilität des Weltklimas ausgegangen waren oder sogar angenommen hatten, dass *Gaia* – die Erdgöttin des James Lovelock – alle Störungen von selbst ausgleichen werde,¹ kam die Darstellung einer solchen Wechselhaftigkeit überraschend. Andere fühlten sich in ihren Ansichten auch bestätigt, denn in den 1960er Jahren hatte es – nach einigen kühlen Jahren – eine heftige Debatte über eine kommende globale Abkühlung gegeben. Manche Klimaforscher sahen in diesen Graphiken hingegen eine Verharmlosung ihrer jüngsten, alarmierenden Erkenntnisse. Denn bereits seit den späten 1970er Jahren stand nicht mehr Abkühlung, sondern globale Erwärmung auf ihrer Agenda: *Global Warming*. Und dieser Aspekt kam auf den Diagrammen des IPCC von 1990 ein-

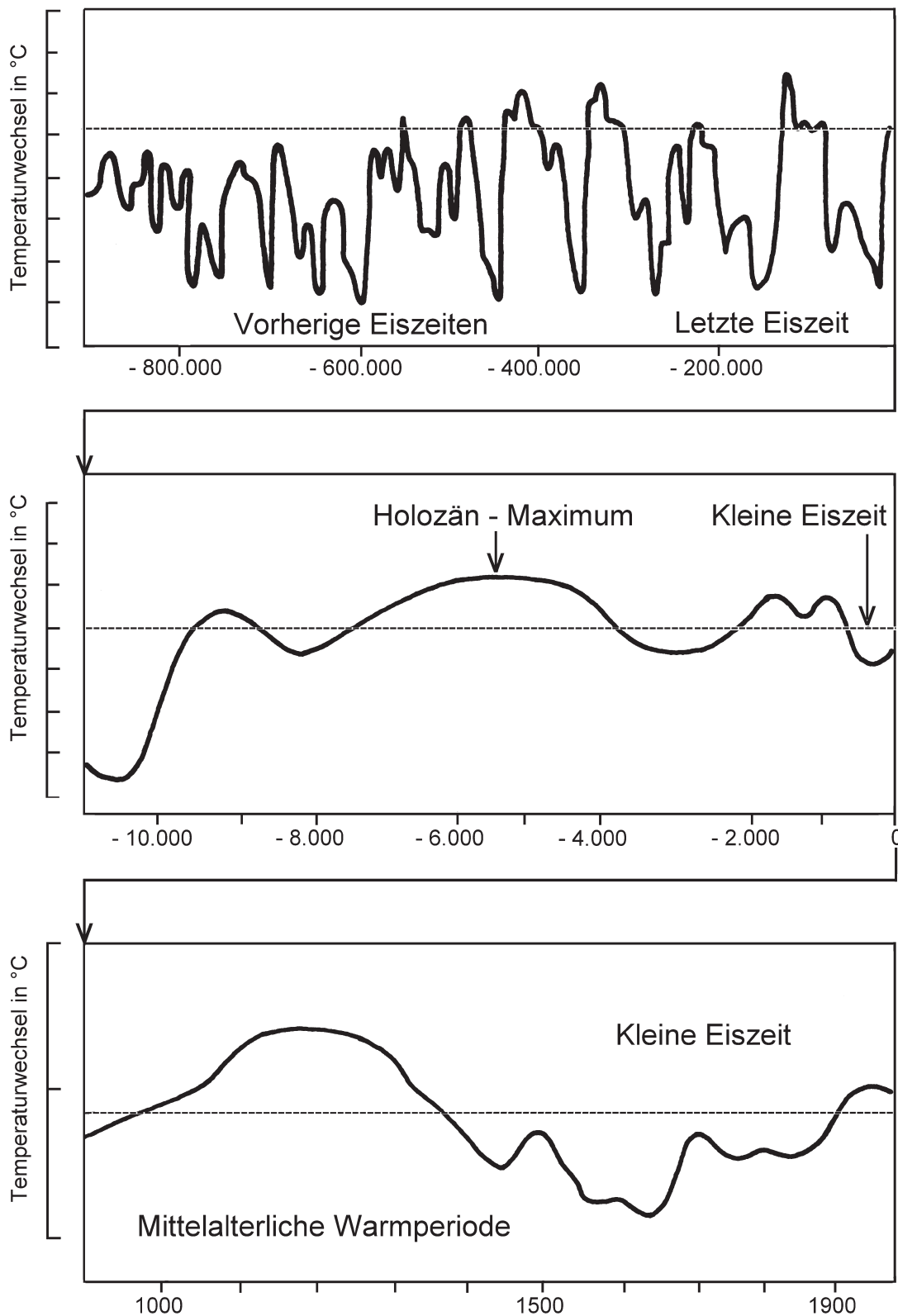


Abb. 1 Das Märchen vom Gleichgewicht des Klimas wurde bereits im ersten Klimareport des IPCC von 1990 widerlegt. Sowohl auf der Ebene der letzten Jahrmillion, als auch der letzten 10 000 Jahre, als auch der letzten 1000 Jahre finden wir einen ständigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten.

deutig zu kurz. Sie ließen eine Erwärmung nach all der Kälte geradezu als wünschenswert erscheinen, während eine wachsende Mehrheit von Klimaforschern wegen Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre in der kommenden Erwärmung eine große Gefahr sah. Diese sorgten dafür, dass die graphische Darstellung der Klimageschichte im nächsten großen Bericht völlig anders aussah.

Die Bedeutung des Hockeyschlägers

Im Juli 2005 eröffnete die Fachzeitschrift *Nature* ihr Heft mit der Meldung, der texanische Kongressabgeordnete Joe Barton (geb. 1949), Mitglied der Republikanischen Partei und Vorsitzender eines *Committee on Energy and Commerce*, fordere im Namen der Steuerzahler Rechenschaft über die Forschungen dreier Klimaspezialisten. Er verlange Auskünfte über den wissenschaftlichen Werdegang, ihre Finanzierung sowie Zugang zu ihren Daten und Computerprogrammen.² Bereits früher hatte Barton dieselben Wissenschaftler wegen angeblich fehlerhafter Methoden im *Wall Street Journal* gezielt angegriffen. Ihre Arbeit hatte den Abschlussbericht des *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC) aus dem Jahre 2001 beeinflusst, der die Umweltpolitik der Bush-Administration an den Pranger gestellt hatte.³

Die Welt der Wissenschaft sah die Freiheit der Forschung in Gefahr. Denn seit dem Ende der Präsidentschaft Bill Clintons (r. 1993–2001) war wiederholt politischer Druck auf Wissenschaftler in Bundesbehörden ausgeübt worden.⁴ Wegen ihrer kompromisslosen Haltung geriet die Klimaforschung zwischen die Fronten der Parteipolitik. Der kalifornische Abgeordnete Henry Waxman von den Demokraten forderte Barton auf, seine Briefe zurückzuziehen. Die Klima-Experten erhielten Schützenhilfe von amerikanischen und internationalen Wissenschaftsinstitutionen, etwa der *National Science Foundation*, der *American Association for the Advancement of Science*, vom Präsidenten der *National Academy of Sciences* und auch von der europäischen *Geophysikalischen Union*.

Im Auge dieses politischen Hurrikans standen die Urheber der «*Hockeystick Theory*», die Klimaforscher Michael Mann (Pennsylvania State University), Raymond S. Bradley (University of Massachus-

setts) und Malcolm K. Hughes (University of Arizona), die 1998 eine Arbeit über die globale Erwärmung der letzten 600 Jahre vorgestellt hatten. Sie behaupteten darin, dass die 1990er Jahre im Durchschnitt wärmer gewesen seien als jedes Jahrzehnt in den vergangenen sechs Jahrhunderten, und dass diese globale Erwärmung «*anthropogen*» sei, zurückzuführen auf die von Menschen verursachten Treibhausgase.⁵ Ihre Klimakurve war zunächst nicht weiter überraschend, denn der längste Teil dieses Zeitraums war durch die globale Abkühlung der *Kleinen Eiszeit* gekennzeichnet. Doch kurz vor den Millenniumsfeiern verlängerten die Klimaforscher ihre Zeitachse um weitere vier Jahrhunderte in die Vergangenheit. Damit umfasste sie das hochmittelalterliche Klima-Optimum, eine der wärmsten Zeiten der jüngeren historischen Vergangenheit. Die Klimakurve der letzten 1000 Jahre besaß die Form eines Hockeyschlägers: Über 900 Jahre habe sich wenig getan, bevor im späten 20. Jahrhundert die Temperaturkurve steil nach oben zeigt. Wir hätten es damit mit einer in der bisherigen Geschichte beispiellosen globalen Erwärmung zu tun. Symbol dieser Sichtweise wurde die Form des Hockeyschlägers.⁶

Klimageschichte als Politikum

Der Streit um die Hockeyschläger-Kurve nahm seit 2001 beinahe religiöse Qualität an. Von ihren Verfechtern wurde sie zum wichtigsten Argument für die Unterzeichnung des *Kyoto-Protokolls* erhoben, mit dem sich 36 Industriestaaten vier Jahre zuvor zur Abgasreduzierung verpflichtet hatten. Zum Zeitpunkt des Streites ging es um die Ratifizierung des Protokolls, die erst im November 2004 mit Russland abgeschlossen werden konnte. Im Februar 2005 traten die Vereinbarungen zur Abgasreduzierung und zum Emissionshandel im Zeitraum 2008–2012 in Kraft. Von den Industriestaaten blieben Australien und die USA, der weltweit größte Emittent von Klimaschadstoffen, der Vereinbarung fern.⁷ Das *Kyoto-Protokoll* war allerdings bereits vor Erscheinen der Hockeyschläger-Kurve beschlossen worden, vor allem aufgrund der älteren IPCC-Berichte von 1990 und seinem *update* von 1996.⁸

Der Streit hält an. Da jede Seite sich im Besitz der Wahrheit wähnt, werden die jeweiligen Gegner als bezahlte Agenten hingestellt. Die Kohle- und Ölindustrie, mit der die Bush-Administration in engen

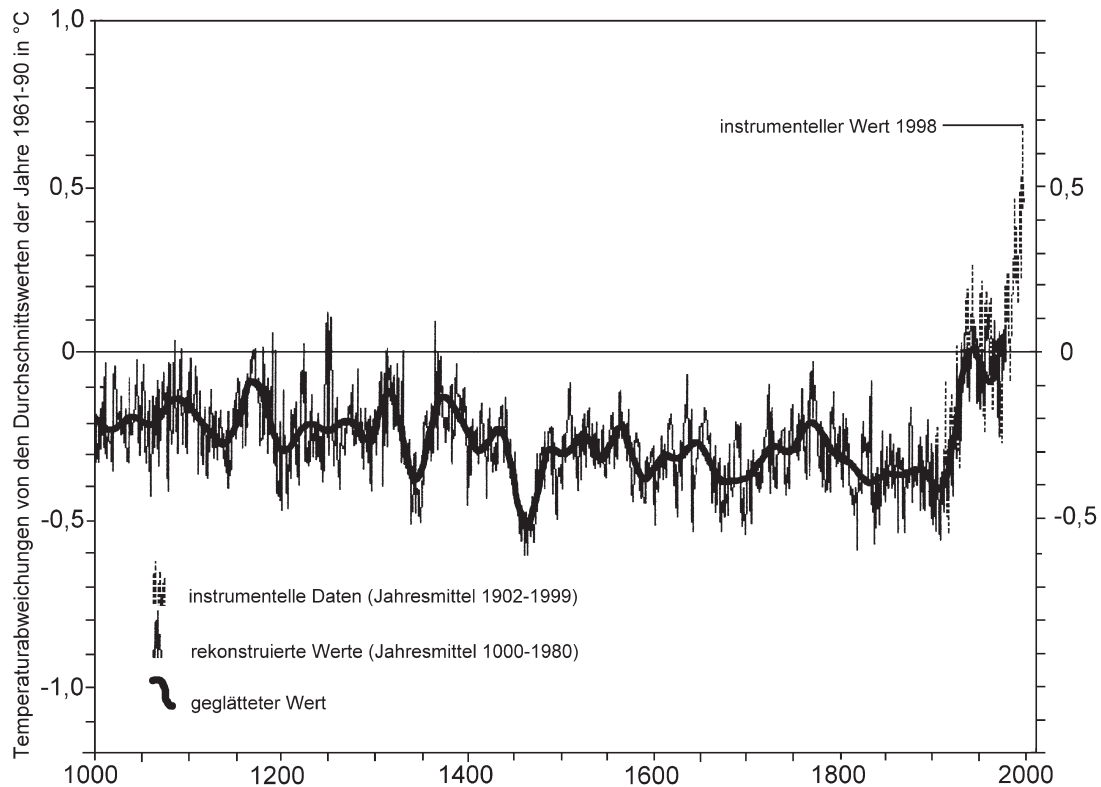


Abb. 2 Das Klima der letzten 1000 Jahre als Hockeyschläger: Im IPCC-Bericht von 2001 werden frühere Temperaturschwankungen eingeebnet, indem hohe aktuelle Messwerte den rekonstruierten Proxydaten aus früheren Jahrhunderten entgegen gehalten werden.

Beziehungen steht, hält wenig von einer Kosten treibenden Reduzierung von Abgasemissionen und unterstützt unternehmensfreundliche Wissenschaftler mit Forschungsaufträgen. Robert F. Kennedy, ein Enkel des großen Präsidenten, sprach von «einer kleinen Armee von der Industrie bezahlter Scharlatane».⁹

Natürlich funktioniert der Korruptionsvorwurf auch in der anderen Richtung, denn die akademischen Arbeitsgruppen besitzen ein vitales Interesse an der Alimentierung ihrer Forschungen und ihrer Forschungsinstitute. Paul Andrew Mayewski, der wissenschaftliche Leiter des bahnbrechenden Eiskernbohrprojekts *GISP2*, gibt in seiner Darstellung der Paläoklimaforschung zu, dass Klimaforscher keine unparteiischen Wissenschaftler seien, sondern persönliche Anliegen verfolgen und sie über Seilschaften und *Pressure Groups* durchsetzen. Es geht um Karrieren, um Geld und um Macht.¹⁰

Die Unterstellung, Klimaforscher kämen aus finanziellen Gründen zu ihren Forschungsergebnissen, dürfte jedoch kaum haltbar sein.



Abb. 3 Der Alarmismus mancher Klimaforscher ist Vielen nicht geheuer. Die These von der anthropogenen Erwärmung wird als Waffe im Kampf um Forschungsmittel interpretiert. Götz Wiedenroth, *Zweierlei Standpunkte, zweierlei Rentabilität*. Karikatur von 2005

Eher schon entspringen manche Äußerungen einer kalkulierten Übertreibung. So sagte Stephen H. Schneider (University of California, Stanford), Mitautor des IPCC-Reports von 2001 und einer der frühen Propagandisten der Globalen Erwärmung,¹¹ in einem Interview: «Um die öffentliche Aufmerksamkeit zu erringen, müssen wir erschreckende Szenarien entwerfen und mit vereinfachten und dramatischen Stellungnahmen in die Offensive gehen.»¹² Doch solche Auffassungen vertritt nur eine Minderheit der Klimaforscher.

Apokalyptische Szenarien sind ebenso kontraproduktiv wie die Stigmatisierung von Kritikern des Hockeysticks als «Klimaleugner».¹³ Doch die Existenz des Klimas leugnet niemand. Die Frage, ob sich das Klima tatsächlich ändert, ist mittlerweile entschieden. Über die zweite Frage, ob diese Veränderung allein auf natürliche Prozesse zurückgeht oder auch durch menschliche Einflüsse bewirkt wird, also «*anthropogen*» ist, herrscht heute ebenfalls weitgehender Konsens. Zurückhaltung muss nur geübt werden, weil niemand in die Zukunft blicken

und Wissenschaft kaum jemals absolute Sicherheit erzielen kann. Die Blamage mit der Vorhersage eines *Global Cooling* in den 1960er Jahren dient dabei als Warnung. Weil aber genügend Indizien und Modellrechnungen vorliegen, gelten die Tatsache einer globalen Erwärmung in der Gegenwart und anthropogene Anteile daran als «sehr wahrscheinlich».¹⁴ Weniger eindeutig ist die Frage zu beantworten, wie hoch der anthropogene Anteil am *Global Warming* zu bemessen ist.

Die Beantwortung der Frage «anthropogen oder natürlich» ist eigentlich zweitrangig, wenn man die Erwärmung kurz- oder mittelfristig gar nicht aufhalten kann. Sie spielt allerdings bei der Diskussion einer angemessenen Reaktion auf den Klimawandel eine Rolle. Dabei zeigen Klimaforscher inzwischen größere Vorsicht im Umgang mit der Öffentlichkeit.¹⁵ Der Glaubenskrieg um den Hockeyschläger hat vorübergehend sogar die Akzeptanz des IPCC-Berichts gemindert und «eine Krise der Glaubwürdigkeit der Klimaforschungs-Studien» ausgelöst. Allerdings ändert dies nichts am Konsens über den Klimawandel unter den Klimaforschern.¹⁶

Aufbau des Buches

Gerade wenn man sich besonders für die letzten Jahrhunderte oder gar nur für unsere Gegenwart oder die Zukunft interessiert, ist es notwendig, in längeren Zeiträumen zu denken. In Kapitel (1) sollen Vorklärungen getroffen werden, die zum Verständnis der späteren Argumente notwendig sind. Hier geht es (a) um die Frage, woher wir unser Wissen beziehen, (b) um die Mechanismen natürlicher Klimaänderungen und (c) um die Entwicklung des Paläoklimas von der Entstehung unseres Planeten bis zum Ende der geologischen Jetztzeit.

Kapitel (2) behandelt das Klima zur Zeit des *Homo sapiens sapiens*, von der letzten großen Eiszeit bis zur Warmzeit des Hochmittelalters. Im Unterschied zum ersten ist es chronologisch aufgebaut. Zunächst haben wir es noch mit einem Abschnitt von annähernd 1 000 000 Jahren zu tun, am Ende mit Perioden von mehreren hundert Jahren.

In Kapitel (3) geht es um die Anzeichen und Auswirkungen der *Kleinen Eiszeit*. Klimahistoriker sind seit längerem der Meinung, dass

dieses Klimapessimismus als Modellfall dienen kann.¹⁷ Zunächst wird deswegen versucht, die physikalischen und sozialen Dimensionen der *Kleinen Eiszeit* zu erfassen, bevor Kapitel (4) eine Auslotung ihrer kulturellen Konsequenzen in Angriff nimmt. Diese reichen von der Suche nach Sündenböcken über eine reflexive Sündendiskussion bis hin zur praktischen Anpassung und einer folgenreichen Bewältigung der Krise durch Industrialisierung, die unsere moderne Welt zum Ergebnis hatte.

Kapitel (5) beschäftigt sich mit der Globalen Erwärmung, wobei der Weg ihrer Entdeckung und die Diskussion ihrer Auswirkungen kurz nachgezeichnet werden. In einem Epilog (6) werden schließlich einige Ergebnisse zusammengefasst.

Die Belege in den Anmerkungen sind auf das Nötigste beschränkt. Die Literatur wird ohne Untertitel, Auflage und nähere Angaben zu Übersetzungen zitiert. Im Anhang werden einige wichtige Titel zur besonderen Beachtung und zum Weiterlesen hervorgehoben. Ein Register erschließt den Text.

Was wissen wir über das Klima?

Quellen zur Klimageschichte

Die Archive der Erde

Als «Archive der Erde» werden alle natürlichen Ablagerungen bezeichnet, aus denen sich mit naturwissenschaftlichen Methoden Aufschlüsse über vergangene Klimata gewinnen lassen. Ihre Erforschung hat sich seit der Entdeckung der *Radioaktivität* enorm weiterentwickelt. Die physikalische Basis liegt in der Tatsache, dass die Atomkerne vieler Elemente instabil sind. Bei ihrem Zerfall senden sie Strahlung aus. Mit Hilfe von Massenspektrometern wird das Verhältnis von Mutter- und Tochterelementen gemessen, und bei Kenntnis der spezifischen *Halbwertszeit* lassen sich Angaben zum Alter machen. Notwendig war auch die Entwicklung von Kenntnissen über die geochemischen Besonderheiten und die Schmelzpunkte von Mineralen und Gesteinen. Über die Bestimmung der Halbwertszeiten ihrer Elemente kann man das Alter von Gesteinen bis zu ihrer Erstarrung zurückdatieren. Damit erhält man gleichzeitig Aufschluss über klimatische Prozesse.¹

Für die Klimageschichte bedeutsam wurde die *Sauerstoffisotopen-Methode*, die 1947 der amerikanische Chemie-Nobelpreisträger Harold C. Urey (1893–1981) erfand. Der Entdecker des «schweren Wassers» (Deuterium) fand heraus, dass man mit Hilfe von Isotopen des Sauerstoffatoms (Oxygenium) die Meerestemperatur vergangener Zeiten berechnen kann. Meerwasser enthält zwei ausgeprägte Typen von Sauerstoffatomen mit unterschiedlicher Neutronenzahl: O-18 und O-16. Beide werden je nach Temperatur in spezifischer Verteilung in Meeresorganismen eingelagert. Der Anteil an schweren Sauerstoff-Isotopen (O-18 enthält zehn anstelle von acht Neutronen) steigt mit zunehmender Kälte zur Zeit der Einlagerung gegenüber den Normalwerten (O-16) an.² Diese Methode revolutionierte zunächst die Sedimentationsanalyse und führte zur Ausweitung der Tiefseebohrtechnik mit sensationellen Ergebnissen für die Eiszeitforschung.³

Besondere Bedeutung besitzt die Ende der 1940er Jahre durch Willard Frank Libby (1908–1980) entwickelte *Radiokarbon-Methode*, weil sie sich zur Altersbestimmung organischer Überreste für den gesamten Zeitraum seit der Entwicklung des *Homo sapiens* eignet. Dies betrifft seine Skelettreste ebenso wie viele seiner Artefakte. In Pflanzen wird Kohlenstoff durch Photosynthese, in Tiere und Menschen durch Ernährung eingelagert. Erst mit dem Tod des Organismus kommt der Austauschprozess zum Erliegen, und der Prozess des radioaktiven Zerfalls beginnt. Diesen Zeitpunkt kann man mit Hilfe der C-14-Analyse bestimmen. Die Grenzen der Radiokarbon-Methode ergeben sich aus der Halbwertszeit des Elements C-14 (ca. 5730 $\pm$ 40 Jahre), sie liegen etwa bei 40–50 000 Jahren.⁴

Die *Sedimentationsanalyse* liefert Aufschlüsse über das Paläoklima, indem sie Zeugnis gibt über warme oder kalte, feuchte oder trockene Vorzeitklimata, über Ablagerungen pflanzlicher oder tierischer Organismen, über vulkanische Ablagerungen, Meeres- und Seespiegel, Flussterrassen, Bodenhorizonte oder Rückstände von Gletschern. Die *Paläobotanik* und die *Paläozoologie* dienen zur Bestimmung der jeweiligen pflanzlichen und tierischen Einlagerungen, wobei die Bestimmung von Leitfossilien auf eine längere Tradition seit dem 17. Jahrhundert zurückblicken kann.⁵ Die *Tiefseebohrtechnik* hat neue Möglichkeiten der Forschung erschlossen, denn das «Gedächtnis des Meeres» liefert Einsichten über die Entwicklung des Bodens, die Beschaffenheit des Wassers, die Arten des Lebens und damit über das jeweilige Klima.⁶

Eine weitere Basismethode zur Klimabestimmung ist die *Eiskernbohrtechnik* in den Polkappen und den großen Gletschern, die am Ende des 20. Jahrhunderts immer noch 10 % der gesamten Landmasse der Erde – gegenüber bis zu 30 % auf dem Höhepunkt der letzten großen Eiszeiten – bedeckten. Der dänische Geophysiker Willi Dansgaard (geb. 1922) entdeckte darin in den 1960er Jahren eine Art «Zeitmaschine»,⁷ die mit relativ präziser Auflösung Auskunft über die Klimaentwicklung langer Zeiträume geben kann. Die Reichweite dieser Analysen reicht potentiell zurück bis zu den Anfängen der gegenwärtigen Eiszeit. In den Eisbohrkernen lassen sich die jährlichen Ablagerungen an einem Wechsel dunkler und heller Schichten ablesen. In diesen Ablagerungen kann nach dem Sauerstoffisotopen-Verfahren die Temperatur ermittelt werden. Zusätzlich geben fest eingeschlossene Gasbläs-

Abb. 4 Die Lage der wichtigsten Eiskernbohrungen auf Grönland.



chen direkte Auskünfte über die Zusammensetzung der Luft. Außerdem können organische Einschlüsse in eingelagerten Stäuben mit der Radiokarbon-Methode altersmäßig bestimmt werden. Zu den Stäuben zählt auch vulkanische Asche, die mit der *Thermoluminiszenz-Methode* näher bestimmt und zugeordnet wird. Mit der Analyse des Sulfatanteils können Erkenntnisse über vulkanische Aktivität gewonnen werden. Jahre mit besonders signifikanten Ausbrüchen dienen als «Zeigerjahre» zur zusätzlichen Eichung der Jahresringe.⁸

Die Auswertung der Eisbohrkerne ist nicht nur vielfältig, sondern reicht auch überraschend weit zurück, vor allem bei den beiden größten Eismassen der Erde, den Gletschern der Antarktis am Südpol und den Gletschern über Grönland nahe dem Nordpol. Die Analyse der durch das «*Northern Greenland Ice Core Project*» (NGRIP) erbohrten Eiskerne hat bereits in den 1960er Jahren eine überraschend detaillierte Darstellung des Klimas der letzten 125 000 Jahre erlaubt.⁹ Der dreißig Kilometer entfernt davon genommene Eisbohrkern von GISP2 (*Greenland Ice Sheet Project 2*) erlaubte bereits einen Rückblick auf 200 000 Jahre.¹⁰ Mit dem russisch-französischen Vostok-Eisbohrkern aus der Antarktis gelang eine Rückschau über 420 000 Jahre in die

618 O-Profile der Eiskerne von Dye 3 und Camp Century

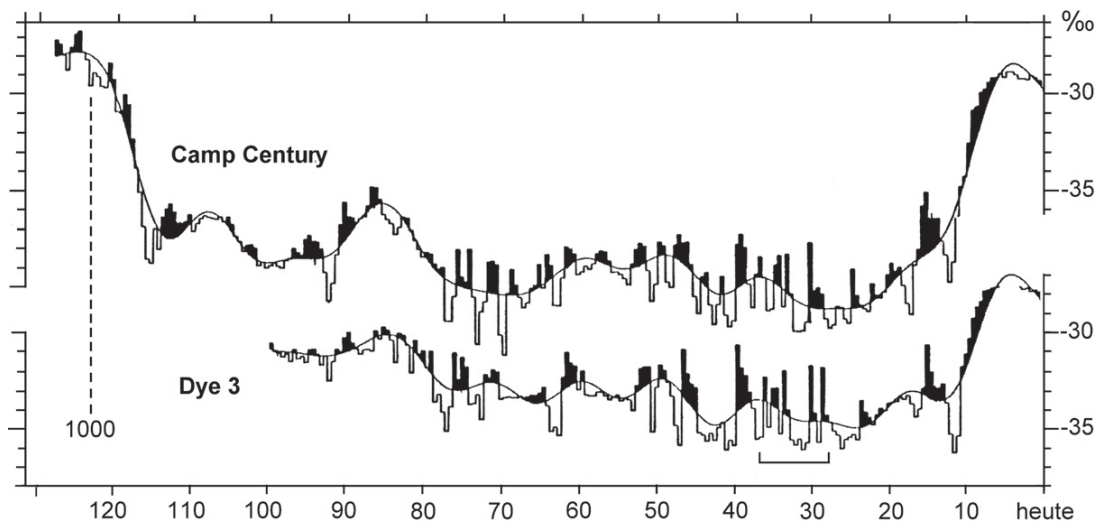


Abb. 5 Eine neue Darstellung der letzten großen Eiszeit, zwischen dem Eem-Interglazial und dem Holozän gelang dem dänischen Eisbohrpionier Willy Dansgaard mit Hilfe der Sauerstoffisotopenanalyse.

Vergangenheit.¹¹ Der bislang am weitesten zurückreichende Eisbohrkern wurde im Jahr 2004 durch das «*European Project for Ice Coring in Antarctica*» (EPICA) zutage gefördert. Das Eis in 3270 Meter Tiefe ist ca. 800 000 Jahre alt und erlaubt Aussagen über die letzten acht großen Eiszeit-Zyklen.¹² Dieses natürliche Klima-Archiv liefert Informationen über die Lebensbedingungen der Vormenschen.¹³

Für die Erfassung von Klimaschwankungen der letzten 40 000–100 000 Jahre kann man noch auf andere Methoden zurückgreifen, so z. B. die *Warvenzählung* (Auswertung geschichteter Ablagerungen in Tonsedimenten, die eine Jahreszählung erlauben), die Pollenanalyse bzw. *Palynologie* (Auswertung von Moorsedimenten zur Bestimmung der Vegetation über die eingelagerten Pflanzenpollen, Sporen etc.), die Vermessung gleichmäßig wachsender Krustenflechten (*Lichenometrie*) für die Erforschung rezenter Gletscherhochstände zur Altersbestimmungen von Endmoränen¹⁴ und die zu Beginn des 20. Jahrhunderts in Amerika entwickelte *Dendrochronologie* (Zählung und Analyse der Jahresringe von Bäumen).

Die Nutzung der Jahresringe für die klimahistorische Forschung (*Dendroklimatologie*) bringt allerdings Unsicherheiten mit sich, die gelegentlich von ihren Anwendern unterschätzt werden: Denn einem dürrftig ausgefallenen Jahresring sieht man es nicht an, ob das Wach-

tum durch Kälte, Dürre oder durch andere Umstände, etwa Insektenbefall, behindert war. Umgekehrt müssen breite Jahresringe, die günstige Wachstumsbedingungen für eine bestimmte Baumart anzeigen, nicht unbedingt allgemein gute Erntejahre bedeuten. Getreide reagiert auf Feuchtigkeit anders als Eichen oder Fichten.¹⁵ Anders als Klimaforscher und Archäologen stehen interdisziplinär arbeitende Kulturhistoriker der Signifikanz von Baumjahresringen für die Erforschung des Klimas deswegen skeptisch gegenüber.¹⁶

Die Archive der Gesellschaft

Unter «Archiven der Gesellschaft» verstehen wir bewusst angelegte Überlieferungen, die in öffentlichen oder privaten Archiven, Bibliotheken, Dateien etc. aufbewahrt werden. Diese Archive setzen Aufzeichnungssysteme (Bild, Zahlen, Ikonogramme, Buchstaben) und speziell die Schriftlichkeit zur Verdauerung von Erinnerung voraus. Die Archivierung wichtiger Schriftstücke, speziell Tontafeln mit Keilschrifttexten, beginnt in den alten Hochkulturen Westasiens. Wichtigste Archivträger waren in den alten Zivilisationen Staatsverwaltungen und religiöse Einrichtungen, die Urkunden, Verzeichnisse und Briefwechsel aufbewahrten oder gezielt Chroniken anlegen ließen, die – neben Inschriften an Gebäuden und Gedenksteinen – unter anderem über Klimakatastrophen berichten. In der griechisch-römischen und in der chinesischen Antike kamen private Bibliotheken hinzu.

Seit dem europäischen Mittelalter wurden in sehr vielen Städten Chroniken geführt, die unter anderem herausgehobene Witterungseignisse für die Nachwelt festhielten. Die Erfindung des Buchdrucks führte seit dem 15. Jahrhundert zu einer Revolutionierung der Informationsspeicherung und zu einer steigenden Bedeutung des Marktes für Informationen, der Bibliotheken und der Öffentlichkeit.

Unter den historischen Aufzeichnungen ragen die *Witterungstagebücher* als spezifische Textgattung der Neuzeit hervor. Vermutlich haben antike Vorbilder die Liebe der europäischen Renaissance dafür wieder erweckt, außerdem der Aufstieg der Astronomie zu einer neuen Leitwissenschaft und speziell eine Idee des Astronomen Johannes Müller (1436–1476), genannt *Regiomontanus*. Sein astronomischer Kalender ließ neben Angaben zur errechneten Position der

Planeten für jeden einzelnen Tag eine Leerzeile für eigene Eintragungen. Da die Astrologie einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen den Planetenkonjunktionen und der Witterung, der Ernte, der Verfügbarkeit von Wind- und Wasserkraft und anderen sublunaren Ereignissen sah, versuchte man sich in Wetter- und Konjunkturprognosen.¹⁷ Die Leerzeile wurde von Benutzern dieser Kalender als Einladung für Notizen zur tatsächlichen Witterung aufgefasst. Durch das systematische Sammeln von Daten sollte die Voraussagegenauigkeit erhöht werden. Allerdings führte der Vergleich von Prognosen und Wirklichkeit zu ernüchternden Resultaten. Der Augustinerchorherr Kilian Leib (1471–1553) bemerkte nach mehr als fünfzehn Jahren Witterungstagebuch kritisch, dass die Prognosen der Bauernregeln und der Astrometeorologie meist falsch waren. Auch Tagebücher wie das des Zürcher Theologen Wolfgang Haller (1525–1601) aus den Jahren 1545–1576 ermöglichen genaue Einblicke in das tägliche Wettergeschehen in einer kritischen Phase der Kleinen Eiszeit.¹⁸

Zahlreiche Aufzeichnungen aus historischer Zeit hängen mit der Qualität der Ernte zusammen und können für die Gewinnung so genannter *Proxydaten* genutzt werden. Dazu gehört die direkte Beobachtung von Klima-Ereignissen wie etwa der erste Schneefall, die Dauer der geschlossenen Schneedecke, die Vereisung von Seen, Flüssen oder gar Meeren, frühe und späte Fröste. Hinzu kommen Daten über das Wachstum von Pflanzen: So reichen Aufzeichnungen über das Eintreten der Kirschblüte in Japan aus rituellen Gründen sehr weit zurück. Ebenso verhält es sich mit den Daten über Aussaat, Obstblüte, Obsternte, Heuernte, Getreideernte oder Weinlese. Schließlich finden sich indirekte Hinweise über die Qualität der Ernte zum Beispiel in Aufzeichnungen über die Höhe des Getreide-Zehnten, einer Feudalabgabe an die Kirche, die in direkter Korrelation zu den Erntemengen stand.¹⁹ Wichtig sind auch die Preise für Brotgetreide, welche in den Herbstmonaten die jeweiligen Erntemengen mit hinlänglicher Genauigkeit widerspiegeln.²⁰ Schließlich enthalten die Quellen auch viele Bemerkungen über die Qualität der Produkte, etwa des Weines, der in sonnenarmen Jahren sauer wurde.²¹

Wer jemals mit Texten des Spätmittelalters oder der Frühen Neuzeit gearbeitet hat, wird sich daran erinnern, dass man ständig auf klimarelevante Informationen stößt. Berichte über klimatische Extremereignisse – Dürre, Überschwemmungen, lange Frostperioden etc.

– können selten anhand nur einer Quelle bewertet werden, da man nie sicher sein kann, ob es sich um lokale Besonderheiten handelt, ob der Berichterstatter übertreibt oder ob es sich gar um erfundene Meldungen mit einer allegorischen Bedeutung handelt. Deshalb haben einige Klimaforscher solche lokalen und regionalen Nachrichten in großen Datenbanken zusammengeführt, beispielsweise der Schweizer Sozialhistoriker Christian Pfister für die letzten 500 Jahre²² oder der deutsche Geograph Rüdiger Glaser für die letzten 1000 Jahre.²³ Die Vielzahl an *Proxydaten* aus ganz Europa erlaubt nicht nur Aussagen über das jährliche Klima, sondern wenigstens monatliche und für die Zeit nach 1500 tägliche und gelegentlich sogar stündliche Rekonstruktionen weiträumiger Klimavorgänge. Aufgrund der bekannten meteorologischen Zusammenhänge lassen sich sogar nachträglich Wetterkarten erstellen. Was für Meteorologen die Wettervorhersage, ist für Klimahistoriker die «Wetternachhersage».²⁴ Im weiteren Sinn können auch Werke der Mythologie, der Literatur, der Kunst und der Kartographie als Klimazeugnisse herangezogen werden, allerdings – wie sich noch zeigen wird – mit einigen methodischen Schwierigkeiten.²⁵

Die instrumentelle Erhebung von Messdaten

Mit dem Beginn der Instrumentenmessungen hat die Errechnung von Proxydaten aus den Witterungsbeobachtungen noch lange nicht ausgedient, denn die ersten Messungen erfolgten punktuell und nach anderen Skalierungen als spätere Erhebungen. Galileo Galilei entwarf 1597 ein Instrument zur Messung der Lufttemperatur, ein *Thermometer*. Sein Schüler Evangelista Torricelli (1608–1647) erfand 1643 das *Barometer* zur Messung des Luftdrucks. Unter Großherzog Ferdinand von Medici (1610–1670) wurde in den 1650er Jahren ein erstes internationales Messnetz errichtet, dessen Daten allerdings schwer verwertbar sind. Messstationen gab es in Florenz, Bologna, Parma, Mailand, Innsbruck, Osnabrück und Paris, seit 1659 auch in London. Diese Initiativen wurden von der 1660 gegründeten *Royal Society for the Advancement of Learning* in London aufgegriffen, deren erster Sekretär Robert Hooke (1635–1703) neben Temperatur und Luftdruck auch noch Windstärke, Feuchtigkeit, Bewölkungsgrad und das Auftreten von Nebel, Regen, Hagel und Schnee dokumentieren ließ.²⁶ Auf

seine Anregung hin sammelte der Pariser Arzt Louis Morin (1635–1715) über beinahe fünfzig Jahre hinweg dreimal täglich exakte Klimadaten. Den anspruchsvollsten Versuch zur Errichtung eines internationalen Messnetzes startete in der Frühen Neuzeit der pfälzische Kurfürst Karl Theodor (1724–1799) mit seiner *Societas Meteorologica Palatina*. Sie sammelte Messdaten zwischen Spitzbergen und Rom, La Rochelle und Moskau.²⁷

Instrumentenmessungen wurden erst im Verlauf des 19. Jahrhunderts gebräuchlicher, wobei aufgrund seiner weltweiten Ausdehnung dem *Britischen Empire* eine Pionierrolle zukam. Im Zeitalter von Queen Victoria (1819–1901) wurden Daten von Europa über Indien bis Australien erhoben. Die schnelleren Kommunikationsmöglichkeiten wie die elektrische Telegraphie sowie die Verlegung des Unterseekabels von England in die USA 1866 verbesserten die weltweite Übertragung und Auswertung von Daten. Man war allerdings immer noch meilenweit entfernt von jenem weltweiten gleichmäßigen Messnetz, das wir seit dem letzten Drittel des 20. Jahrhunderts kennen und dessen Daten per Satellit zur Auswertung gesandt werden.

Außer der bodennahen Lufttemperatur in den Hauptstädten und an festen meteorologischen Stationen gibt es aus dieser Zeit erste Messdaten der Wassertemperaturen in den Ozeanen. Die Daten der Wettersatelliten liefern erst seit den 1960er Jahren ein Bild der Erde für den abendlichen Wetterbericht. Aufwändige Klimamodellberechnungen sind gar erst seit dem Ende des 20. Jahrhunderts mit einer neuen Generation von Computern möglich.

Ursachen von Klimawandel

Die Sonne als Energiequelle

Die in der Sonne durch Kernfusion freigesetzte und abgestrahlte Energie bildet die Grundlage für chemische, biologische und klimatische Prozesse auf der Erde. Die Strahlungsleistung der Sonne wurde in der Solarphysik lange als gleichförmig aufgefasst («*Sonnenkonstante*»), tatsächlich schwankt sie jedoch. Bereits im 17. Jahrhundert wurde mit Fernrohren der Zusammenhang von Wärmebilanz und Sonnenflecken entdeckt. Die Verminderung oder Abwesenheit von Sonnenflecken fiel meist mit Phasen der Abkühlung auf der Erde zusammen. Heute meint man unter anderem einen elfjährigen Sonnenfleckenzyklus erkennen zu können. Die Phasen verminderter Sonneneinstrahlung werden unter anderem durch Schwankungen der Erdbahnparameter verursacht.

Der jugoslawische Astronom Milutin Milankovic (1879–1958)¹ versuchte mit diesen Schwankungen den etwa gleichmäßigen Zyklus von Kaltzeiten während des Pleistozäns zu erklären. Dazu zählen die Exzentrizität der Erdbahn sowie Variationen in der Neigung der Erdachse und der Rotationsachse mit unterschiedlichen Perioden.² Die von Milankovic postulierten Zyklen von ca. 100 000 Jahren konnten in Tiefseebohrkernen anhand der Sauerstoffisotopenverteilung in pazifischem Plankton nachgewiesen werden. Die beteiligten Forscher sehen den Nachweis als erbracht, nachdem für die letzten 800 000 Jahre sieben derartige Zyklen annähernd an der richtigen Position entdeckt wurden.³ Auch Erforscher von Eisbohrkernen halten die Milankovic-Zyklen für relevant für das Verständnis der Entstehung der Eiszeiten und finden sie im Eis wieder. Allerdings entsprach die Dauer der Zyklen im Eis in den letzten 100 000 Jahren nicht immer exakt den Erwartungen.⁴

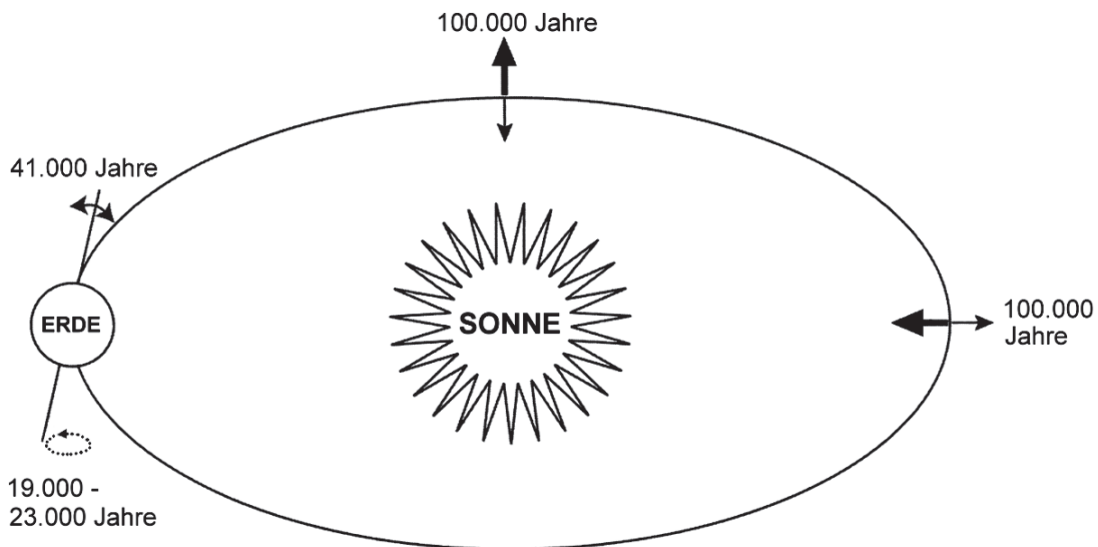


Abb. 6 Die zyklischen Schwankungen der Erdbahn nach Milankovic erklären die Periodizität der Vereisungszyklen

Die Erdatmosphäre

Der zweite Faktor ist die Zusammensetzung der Lufthülle um den Planeten. Sie entscheidet über die Wirkung der Sonneneinstrahlung auf der Erde. Luft besteht aus ca. 20 % Sauerstoff und beinahe 80 % Stickstoff sowie Spurengasen, darunter nur ca. 0,03 % des Treibhausgases Kohlendioxid (CO_2). Untersuchungen von Eisbohrkernen der russisch-französischen Vostok-Forschungsstation in der Antarktis haben für den Zeitraum der letzten 420 000 Jahre ergeben, dass der Gehalt an Spurengasen und speziell an Kohlendioxid in der Luft in direkter Relation zur Höhe der Temperaturen steht.⁵ Die Verringerung des Kohlendioxidanteils korrespondiert mit Abkühlung, die Erhöhung mit Erwärmung. Einen solchen Zusammenhang wird man also auch für die Zeit davor annehmen dürfen.

Die Wirkung der Erdatmosphäre auf das Klima erfolgt strikt nach dem *Erhaltungssatz der Energie*: Die auf der Erde ankommende Sonnenstrahlung abzüglich des reflektierten Anteils ist gleich der von der Erde abgestrahlten Wärmestrahlung. Ozean und Atmosphäre verteilen die Wärme innerhalb des Klimasystems und haben Einfluss auf das regionale Klima. Die Höhe der Abstrahlung wird durch den Gehalt der Atmosphäre an absorbierenden Gasen beeinflusst. Dazu ge-

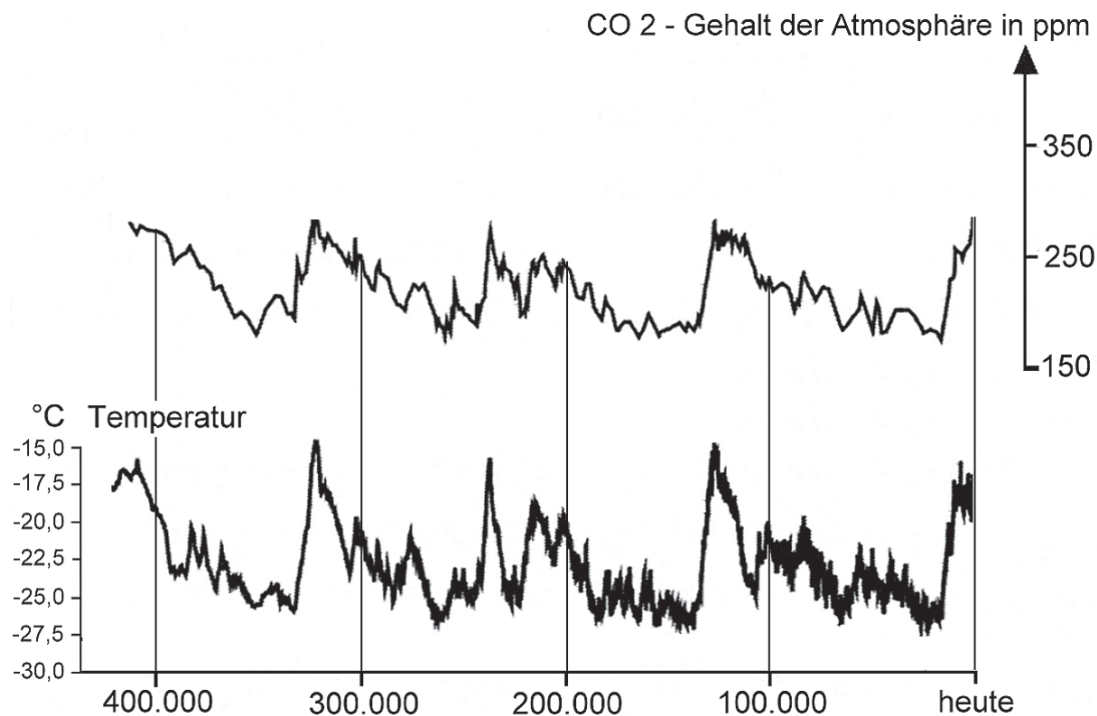


Abb. 7 Temperaturverlauf und Kohlendioxidgehalt der Luft nach dem Vostok-Eisbohrkern (Antarktis) in den letzten 420 000 Jahren – offenbar gibt es einen Zusammenhang, aber wie sieht die kausale Verknüpfung aus?

hören neben Wasserdampf Spurengase wie Methan (CH_4), Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW), Distickstoffoxyd (N_2O) und eben Kohlendioxyd (CO_2). Unter den Spurengasen ist der Kohlendioxyd-anteil besonders variabel. Sein Anteil betrug Ende des 19. Jahrhunderts 230 ppM (parts per Million), am Ende des 20. Jahrhunderts war er auf 350 ppM angestiegen. Während erdgeschichtlicher Warmzeiten, etwa während der Kreidezeit (145–65 Millionen Jahre), in der die Dinosaurier die Erde beherrschten, hatte der CO_2 -Anteil bereits bei mehr als 1000 ppM gelegen. Danach war er ständig gesunken, bis er in der gegenwärtigen Eiszeit auf einem Tiefpunkt anlangte.⁶ Vielen Klimaforschern gilt der direkte Zusammenhang von CO_2 -Anteilen in der Luft und globaler Durchschnittstemperatur schlichtweg als erwiesen, er ist so etwas wie ein Dogma der gegenwärtigen Klimatologie. Allerdings zeigt der Vergleich der Kurven aus dem Vostok-Eiskern, dass die Kurven von Temperatur und Kohlendioxyd nicht einfach parallel verlaufen, sondern dass man erhebliche Abweichungen in der Amplitude und auch in der zeitlichen Abfolge beobachten kann. Vorsichtige Interpreten geben daher zu bedenken, es sei «un-

klar, ob die veränderten Temperaturen Ursache für die veränderten CO₂-Konzentrationen sind oder umgekehrt – oder ob vielleicht beide von einem dritten, unbekannten Vorgang gesteuert werden».⁷

Die Plattentektonik

Der dritte Faktor bei der Genese der Eiszeiten ist die Plattentektonik, die Bewegung von Teilen der Erdkruste im oberen Erdmantel. Durch die Wanderung der Urkontinente über die Erdoberfläche veränderten sich die Meeresströmungen und – wenn Kontinente kollidierten und sich Gebirge auffalteten – die Windrichtungen und die Niederschlagsverteilung. Außerdem beeinflussten diese Prozesse das Verhältnis von Land- und Wasserfläche und die Höhe des Meeresspiegels. Sobald sich Landmassen den Polen nähern und an diesen kühlfsten Punkten der Erde das freie Strömen des Meerwassers behindert wird, bildet sich Eis. Die Schnee- und Eisdecke führt zum *Albedo-Effekt*, mehr Sonnenlicht wird reflektiert, was zu einer positiven Rückkopplung und damit zu einer vermehrten Abkühlung führt. Der ins All zurückgestrahlte Anteil der Sonnenstrahlung, die sogenannte *Albedo*, beträgt über Neuschnee ca. 95 %, über See dagegen weniger als 10 %. Insgesamt beträgt die *Albedo* im heutigen Klimasystem 30 %, während der Eiszeiten war sie entsprechend höher.

Nach Steven Stanley wurde jedes große Massenaussterben dadurch verursacht, dass eine größere Landmasse auf ihrer Wanderung an eine Polkappe gelangte und eine dauerhafte Eisbildung auslöste. Durch die beschriebenen Rückkopplungseffekte rutschte der Planet dann in eine lange Eiszeit, die vor allem tropische Flora und Fauna zum Erlöschen brachte, da für sie keine Abwanderung möglich war. Überdies änderten globale Vereisungen die Meereshöhen; das Meer zog sich weit vom Land zurück und veränderte die Konturen der Küstenregionen und der Kontinente.⁸ Auch in jüngerer geologischer Zeit war die Kontinentaldrift noch klimawirksam. So unterbrach etwa vor 5 Millionen Jahren die Kollision von Afrika und Eurasien die äquatorialen Strömungen, und die Auffaltung der Alpen begann.⁹ Das nächste plattentektonische Großereignis war vor 3,5 Millionen Jahren die Entstehung der mittelamerikanischen Landbrücke. Durch die Schließung des Durchlasses zwischen Nord- und Südamerika wurden

äquatoriale Strömungen umgeleitet, und der Golfstrom entstand, der Wärme und Feuchtigkeit nach Europa transportiert.¹⁰

Mehr Informationen zu diesem und vielen weiteren Büchern aus dem Verlag C.H.Beck finden Sie unter: www.chbeck.de