

Mit 21 Abbildungen und 1 Tabelle

- 1. Auflage. 2006
- 2., durchgesehene Auflage. 2006
- 3., aktualisierte Auflage. 2006
- 4. Auflage. 2007
- 5., aktualisierte Auflage. 2007
- 6. Auflage. 2007
- 7., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. 2012

8., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. 2018

Originalausgabe
© Verlag C.H.Beck oHG, München 2006
Satz: Fotosatz Amann, Memmingen
Druck und Bindung: Druckerei C.H.Beck, Nördlingen
Umschlagentwurf: Uwe Göbel, München
Printed in Germany
ISBN 978 3 406 72672 9

www.chbeck.de

Inhalt

Einleitung	7
1. Aus der Klimageschichte lernen 9	
Klimaarchive	9
Was bestimmt das Klima?	12
Die Frühgeschichte der Erde	14
Klimawandel über Jahrtausende	17
Eine plötzliche Warmphase	18
Die Eiszeitzyklen	20
Abrupte Klimawechsel	23
Das Klima des Holozän	25
Einige Folgerungen	28
2. Die globale Erwärmung 29	
Etwas Geschichte	29
Der Treibhauseffekt	30
Der Anstieg der Treibhausgaskonzentration	32
Der Anstieg der Temperatur	36
Die Ursachen der Erwärmung	38
Die Klimasensitivität	41
Projektionen für die Zukunft	45
Wie sicher sind die Aussagen?	49
Zusammenfassung	51
3. Die Folgen des Klimawandels 53	
Der Gletscherschwund	55
Rückgang des polaren Meereises	57
Tauen des Permafrosts	58
Die Eisschilde in Grönland und der Antarktis	59
Der Anstieg des Meeresspiegels	61
Änderung der Meeresströmungen	65

Wetterextreme	68
Auswirkungen auf Ökosysteme	72
Landwirtschaft und Ernährungssicherheit	74
Ausbreitung von Krankheiten	76
Zusammenfassung	77
4. Klimawandel in der öffentlichen Diskussion	79
Die Klimadiskussion in den USA	80
Die Lobby der «Klimaskeptiker»	82
Zuverlässige Informationsquellen	83
Zusammenfassung	86
5. Die Lösung des Klimaproblems	88
Vermeiden, Anpassen oder Ignorieren?	88
Gibt es den optimalen Klimawandel?	91
Globale Zielvorgaben	95
Der Gestaltungsraum für Klimallösungen	98
Das Kyoto-Protokoll	98
Der WBGU-Pfad zur Nachhaltigkeit	101
Anpassungsversuche	109
Die Koalition der Freiwilligen oder «Leading by Example»	115
Der Pariser Klimavertrag	119
Epilog: Der Geist in der Flasche	132
Quellen und Anmerkungen	135
Literaturempfehlungen	143
Sachregister	143

Einleitung

Der Klimawandel ist kein rein akademisches Problem, sondern hat große und handfeste Auswirkungen auf die Menschen – für viele ist er sogar eine Bedrohung für Leib und Leben (siehe Kap. 3). Gegenmaßnahmen erfordern erhebliche Investitionen. Deshalb ist es noch wichtiger als in den meisten anderen Bereichen der Wissenschaft, immer wieder die Belastbarkeit der gegenwärtigen Kenntnisse zu hinterfragen und die verbleibenden Unsicherheiten zu beleuchten. Fragen wir daher, worauf die Erkenntnisse der Klimatologen beruhen.

Viele Menschen glauben, dass die Bedrohung durch den globalen Klimawandel eine theoretische Möglichkeit ist, die sich aus unsicheren Modellberechnungen ergibt. Gegenüber solchen Modellrechnungen haben sie ein verständliches Misstrauen – schließlich ist ein Klimamodell für den Laien undurchschaubar und seine Verlässlichkeit kaum einzuschätzen. Manch einer glaubt gar, wenn die Computermodelle fehlerhaft sind, dann gibt es vielleicht gar keinen Grund zur Sorge über den Klimawandel.

Dies trifft jedoch nicht zu. Die wesentlichen Folgerungen über den Klimawandel beruhen auf Messdaten und elementarem physikalischen Verständnis. Modelle sind wichtig und erlauben es, viele Aspekte des Klimawandels detailliert durchzurechnen. Doch auch wenn es gar keine Klimamodelle gäbe, würden Klimatologen vor dem anthropogenen Klimawandel warnen.

Der Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre ist eine gemessene Tatsache, die selbst Skeptiker nicht anzweifeln. Auch die Tatsache, dass der Mensch dafür verantwortlich ist, ergibt sich unmittelbar aus Daten – aus den Daten unserer Nutzung der fossilen Energien – und unabhängig davon nochmals aus Isotopenmessungen. Wie außerordentlich dieser Anstieg ist, zeigen die Daten aus den antarktischen Eisbohrkernen – niemals zumindest seit fast einer Million Jahre war die CO₂-Konzentra-

tion auch nur annähernd so hoch, wie sie in den letzten hundert Jahren geklettert ist.

Die erwärmende Wirkung des CO₂ auf das Klima wiederum ist seit mehr als hundert Jahren akzeptierte Wissenschaft. Die Strahlungswirkung des CO₂ ist im Labor vermessen, der Strahlungstransfer in der Atmosphäre ein bestens bekannter, ständig bei Satellitenmessungen verwendeter Aspekt der Physik. Die durch den Treibhauseffekt erwartete Zunahme der an der Erdoberfläche ankommenden langwelligen Strahlung wurde 2004 durch Messungen des Schweizer Strahlungsmessnetzes belegt.¹ Über die Störung des Strahlungshaushaltes unseres Planeten durch den Menschen kann es daher – man möchte hinzufügen: leider – keinen Zweifel geben.

Entscheidend ist letztlich die Frage: Wie stark reagiert das Klimasystem auf diese Störung des Strahlungshaushaltes? Modelle sind hier sehr hilfreich. Arrhenius hat jedoch 1896 gezeigt, dass man dies auch mit Papier und Bleistift abschätzen kann,² und die antarktischen Eiskerne erlauben eine davon unabhängige Abschätzung mittels Regressionsanalyse direkt aus Daten.³ Auch die frühere Klimageschichte deutet, wie wir sehen werden, auf eine stark klimaverändernde Wirkung des CO₂ hin.

Auch die Tatsache, dass das Klima sich derzeit bereits verändert, ergibt sich direkt aus Messungen – die Jahre 2016, 2017 und 2015 waren laut der meteorologischen Weltorganisation WMO in Genf die drei global wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen im 19. Jahrhundert. Die Gletscher gehen weltweit zurück (siehe Kap. 3), und Proxy-Daten zeigen, dass das Klima im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich so warm war wie nie zuvor seit mindestens tausend Jahren.

Ohne detaillierte Klimamodelle wären wir etwas weniger sicher, und wir könnten die Folgen weniger gut abschätzen – aber auch ohne diese Modelle würde alle Evidenz sehr stark darauf hindeuten, dass der Mensch durch seine Emissionen von CO₂ und anderen Gasen im Begriff ist, das Klima einschneidend zu verändern.

1. Aus der Klimageschichte lernen

Das Klima unseres Heimatplaneten hat immer wieder spektakuläre Wandlungen durchgemacht. In der Kreidezeit (vor 140 bis 65 Millionen Jahren) stapften selbst in arktischen Breiten riesige Saurier durch subtropische Vegetation, und der CO₂-Gehalt der Atmosphäre war ein Vielfaches höher als heute. Dann kühlte sich die Erde langsam ab und pendelt nun seit zwei bis drei Millionen Jahren regelmäßig zwischen Eiszeiten und Warmzeiten hin und her. In den Eiszeiten drangen gigantische Gletscher bis weit nach Deutschland hinein vor, und unsere Vorfahren teilten sich die eisige Steppe mit dem pelzigen Mammut. Mitten in der jetzigen Warmzeit, dem seit 10 000 Jahren herrschenden Holozän, trocknete plötzlich die Sahara aus und wurde zur Wüste.

Nur vor dem Hintergrund der dramatischen Klimaveränderungen der Erdgeschichte lässt sich der gegenwärtige Klimawandel verstehen und einordnen. Ist er durch den Menschen wesentlich mit verursacht, oder ist er Teil natürlicher Klimazyklen? Zur Beantwortung dieser Frage brauchen wir ein Grundverständnis der Klimageschichte. Wir beginnen das Buch deshalb mit einer Zeitreise. In diesem Kapitel diskutieren wir, wie sich das Klima auf unterschiedlichen Zeitskalen entwickelt hat: von Hunderten von Jahrmillionen bis zu den abrupten Klimasprüngen, die in jüngster Zeit die Klimaforscher beschäftigen. Vor allem wird uns dabei interessieren, welche Kräfte für die Klimaänderungen verantwortlich sind und was sich aus der Reaktion des Klimasystems in der Vergangenheit lernen lässt.

Klimaarchive

Woher wissen wir überhaupt etwas über das Klima vergangener Epochen? Manche Zeugen früherer Klimawechsel stehen unübersehbar in der Landschaft – zum Beispiel die Endmoränen

längst abgeschmolzener Gletscher. Das meiste Wissen über die Geschichte des Erdklimas ist jedoch das Ergebnis einer mühsamen Detektivarbeit mit ständig verfeinerten Methoden. Wo immer sich etwas über längere Zeiträume ablagert oder aufbaut – seien es Sedimente am Meeresgrund, Schneeschichten auf Gletschern, Stalaktiten in Höhlen oder Wachstumsringe in Korallen und Bäumen –, finden Forscher Möglichkeiten und Methoden, daraus Klimadaten zu gewinnen. Sie bohren jahrelang durch das massive Grönlandeis bis zum Felsgrund oder ziehen aus tausenden Metern Wassertiefe Sedimentkerne, sie analysieren mit empfindlichsten Messgeräten die Isotopenzusammensetzung von Schnee oder bestimmen und zählen in monatelanger Fleißarbeit unter dem Mikroskop winzige Kalkschalen und Pflanzenpollen.⁴

Am Beispiel der Eisbohrkerne lässt sich das Grundprinzip gut verstehen. Gigantische Gletscher, Eispanzer von mehreren tausend Metern Dicke, haben sich in Grönland und der Antarktis gebildet, weil dort Schnee fällt, der aufgrund der Kälte aber nicht wieder abtaut. So wachsen die Schneelagen immer mehr in die Höhe; der ältere Schnee darunter wird durch das Gewicht der neuen Schneelast zu Eis zusammengepresst. Im Laufe der Jahrtausende stellt sich ein Gleichgewicht ein: Die Eismasse wächst nicht mehr in die Höhe, weil das Eis zu den Rändern hin und nach unten abzufließen beginnt. Im Gleichgewicht wird jährlich genauso viel Eis neu gebildet wie an den Rändern abschmilzt. Letzteres geschieht entweder an Land, wenn das Eis in niedrigere und damit wärmere Höhenlagen hinuntergeflossen ist – dies ist bei Gebirgsgletschern der Fall und auch typisch für den grönländischen Eisschild. Oder es geschieht, indem das Eis bis ins Meer fließt, dort ein schwimmendes Eisschelf bildet und von unten durch wärmeres Seewasser abgeschmolzen wird – so geschieht es um die Antarktis herum.

Bohrt man einen solchen Eisschild an, dann findet man mit zunehmender Tiefe immer älteres Eis. Wenn die Schneefallmengen groß genug sind und einen deutlichen Jahresgang haben (wie in Grönland, wo durch den Schneefall jährlich eine 20 Zentimeter dicke neue Eisschicht entsteht), kann man sogar einzelne Jahres-

schichten erkennen. Denn in der Saison mit wenig Schneefall lagert sich Staub auf dem Eisschild ab, und es entsteht eine dunklere Schicht, während in der schneereichen Jahreszeit eine hellere Lage entsteht. Diese Jahresschichten kann man abzählen – dies ist die genaueste Datierungsmethode für das Eis.⁵ In Grönland reicht das Eis ca. 120 000 Jahre in die Vergangenheit zurück. In der Antarktis, wo das Klima trockener und damit die Schneefallrate gering ist, hat das Europäische EPICA-Projekt im Jahr 2003 sogar über 800 000 Jahre altes Eis geborgen.⁶

An dem Eis kann man eine Vielzahl von Parametern messen. Einer der wichtigsten ist der Gehalt an Sauerstoff-Isotop 18. Bei vielen physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen findet eine so genannte Fraktionierung statt: Sie laufen für verschiedene Isotope unterschiedlich schnell ab. So verdunsten Wassermoleküle mit dem «normalen» Sauerstoff-16 schneller als die etwas schwereren mit Sauerstoff-18. Die Fraktionierung ist dabei abhängig von der Temperatur. Dies gilt auch für die Fraktionierung bei der Bildung von Schneekristallen – deshalb hängt der Gehalt an Sauerstoff-18 im Schnee von der Temperatur ab. Nach einer geeigneten Eichung kann man den Sauerstoff-18-Gehalt im Eisbohrkern als ein annäherndes Maß (als so genanntes Proxy) für die Temperatur zur Zeit der Entstehung des Schnees nehmen.

Andere wichtige Größen, die im Eis gemessen werden können, sind der Staubgehalt und die Zusammensetzung der in kleinen Bläschen im Eis eingeschlossenen Luft – so verfügt man sogar über Proben der damaligen Atmosphäre. Man kann daran den früheren Gehalt an Kohlendioxid, Methan und anderen Gasen bestimmen. Zu Recht berühmt ist der in den achtziger und neunziger Jahren in der Antarktis gebohrte französisch-russische Wostok-Eiskern,⁷ mit dem erstmals eine genaue Geschichte des Temperaturverlaufs und der atmosphärischen CO₂-Konzentration der letzten 420 000 Jahre gewonnen wurde (Abb. 1.1).

Aus den verschiedenen Klimaarchiven werden mit einer Vielzahl von Verfahren ganz unterschiedliche Proxy-Daten gewonnen. Manche davon geben Auskunft über die Eismenge auf der Erde, über den Salzgehalt der Meere oder über Niederschlagsmengen. Diese Proxy-Daten haben unterschiedliche Stärken

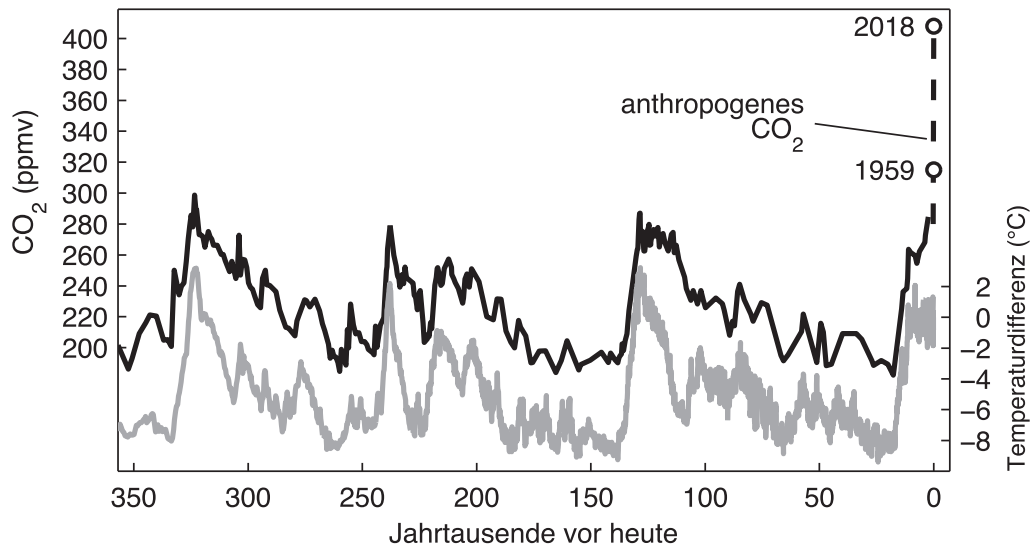


Abb. 1.1: Verlauf der Temperatur in der Antarktis (graue Kurve, Änderung relativ zu heute) und der CO₂-Konzentration der Atmosphäre (schwarze Kurve) über die abgelaufenen 350 000 Jahre aus dem Wostok-Eiskern.⁷ Man erkennt drei Eiszeitzyklen. Am Ende ist der vom Menschen verursachte Anstieg des CO₂ gezeigt.

und Schwächen – so ist etwa bei Tiefseesedimenten die zeitliche Auflösung in der Regel deutlich geringer als bei Eiskernen, dafür reichen die Daten aber viel weiter zurück, bis zu Hunderten von Millionen Jahren. Bei vielen Proxies gibt es noch Probleme mit der genauen Datierung und Unsicherheiten in der Interpretation. Aus einer einzelnen Datenreihe sollten daher nicht zu weit reichende Schlüsse gezogen werden; erst wenn Ergebnisse durch mehrere unabhängige Datensätze und Verfahren bestätigt wurden, können sie als belastbar gelten. In ihrer Gesamtheit betrachtet liefern Proxy-Daten heute jedoch bereits ein erstaunlich gutes und detailliertes Bild der Klimageschichte.

Was bestimmt das Klima?

Unser Klima ist im globalen Mittel das Ergebnis einer einfachen Energiebilanz: Die von der Erde ins All abgestrahlte Wärmestrahlung muss die absorbierte Sonnenstrahlung im Mittel ausgleichen. Wenn dies nicht der Fall ist, ändert sich das Klima. Würde etwa mehr absorbiert als abgestrahlt, würde das Klima immer wärmer, so lange, bis die dadurch zunehmende Wärmestrahlung die ankommende Strahlung wieder ausgleicht und

sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Es gilt also ein einfacher Erhaltungssatz der Energie: Die auf der Erde ankommende Sonnenstrahlung abzüglich des reflektierten Anteils ist gleich der von der Erde abgestrahlten Wärmestrahlung. (Die durch Pflanzen zur Photosynthese «abgezweigte» Energie, der Wärmefluss aus dem Erdinnern und die vom Menschen freigesetzte Verbrennungswärme sind hier vernachlässigbar.) Ozean und Atmosphäre verteilen die Wärme innerhalb des Klimasystems und spielen für das regionale Klima eine wichtige Rolle.

Klimaänderungen sind die Folge von Änderungen in dieser Energiebilanz. Dafür gibt es drei grundsätzliche Möglichkeiten. Erstens kann die ankommende Sonnenstrahlung durch Änderungen in der Umlaufbahn um die Sonne oder in der Sonne selbst variieren. Zweitens kann der ins All zurückgespiegelte Anteil sich ändern. Diese so genannte Albedo beträgt im heutigen Klima 30%. Sie hängt von der Bewölkung und der Helligkeit der Erdoberfläche ab, also von Eisbedeckung, Landnutzung und Verteilung der Kontinente. Und drittens wird die abgehende Wärmestrahlung durch den Gehalt der Atmosphäre an absorbierenden Gasen (oft Treibhausgase genannt) und Aerosolen (also Partikeln in der Luft) beeinflusst – siehe Kapitel 2. All diese Möglichkeiten spielen beim Auf und Ab der Klimageschichte eine Rolle. Zu unterschiedlichen Zeiten dominieren dabei jeweils unterschiedliche Faktoren – welcher Einfluss für einen bestimmten Klimawandel verantwortlich ist, muss also von Fall zu Fall untersucht werden. Eine allgemeine Antwort – etwa dass generell entweder die Sonne oder das CO₂ Klimaveränderungen bestimmt – ist nicht möglich.

Zum Glück ist die Berechnung von Klimagrößen (also Mittelwerten) einfacher als die Wettervorhersage, denn Wetter ist stochastisch und wird stark durch Zufallsschwankungen geprägt, das Klima dagegen kaum. Stellen wir uns einen Topf mit brodelnd kochendem Wasser vor: Wettervorhersage gleicht dem Versuch zu berechnen, wo die nächste Blase aufsteigen wird. Eine «Klimaussage» wäre dagegen, dass die mittlere Temperatur kochenden Wassers bei Normaldruck 100°C beträgt, im Gebirge auf 2500 Meter Höhe durch den geringeren Luftdruck (also bei ver-