

Welche Faktoren sind für unser Klima verantwortlich, wie kommt es zum weltweiten Klimawandel, mit welchen dramatischen Auswirkungen haben wir zu rechnen, und welche Gegenmaßnahmen müssten ergriffen werden? Zwei international führende Experten geben einen kompakten und verständlichen Überblick über den aktuellen Stand unseres Wissens und zeigen Lösungswege auf.

Stefan Rahmstorf forscht am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und ist Professor für Physik der Ozeane an der Universität Potsdam.

Hans Joachim Schellnhuber ist Gründer und Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und Physik-Professor an den Universitäten Potsdam und Oxford.

Originalausgabe



Nat
1126

Rahm

Rahmstorf/Schellnhuber **DER KLIMAWANDEL**
C.H.BECK

S. Rahmstorf
H. J. Schellnhuber
DER KLIMAWANDEL



Der Klimawandel ist – nicht zuletzt nach der Katastrophe von New Orleans – in aller Munde. Angesichts seiner einschneidenden und globalen Bedeutung für Natur und Zivilisation ist das kein Wunder. Doch was ist eigentlich unter Klimawandel zu verstehen, und welche Faktoren sind für das Klima verantwortlich? Zwei international anerkannte Klima-Experten geben einen kompakten und verständlichen Überblick über den derzeitigen Stand unseres Wissens und zeigen Lösungswege auf.

Stefan Rahmstorf forscht am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und ist Professor für Physik der Ozeane an der Universität Potsdam.

Hans Joachim Schellnhuber ist Gründer und Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und Physik-Professor an den Universitäten Potsdam und Oxford.

Stefan Rahmstorf
Hans Joachim Schellnhuber

DER KLIMAWANDEL

Diagnose, Prognose, Therapie

Verlag C. H. Beck

Mit 25 Abbildungen und 2 Tabellen



Originalausgabe

© Verlag C. H. Beck oHG, München 2006

Satz: Fotosatz Amann, Aichstetten

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

Umschlagentwurf: Uwe Göbel, München

Printed in Germany

ISBN-10: 3 406 50866 9

ISBN-13: 978 3 406 50866 0

www.beck.de

Inhalt

Einleitung	7
I. 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	33
Der Anstieg der Temperatur	36
Die Ursachen der Erwärmung	38
Die Klimasensitivität	42
Projektionen für die Zukunft	46
Wie sicher sind die Aussagen?	50
Zusammenfassung	52
3. Die Folgen des Klimawandels	54
Der Gletscherschwund	56
Rückgang des arktischen Meer-Eises	58
Tauen des Permafrosts	60
Die Eisschilde in Grönland und der Antarktis	60
Der Anstieg des Meeresspiegels	63
Änderung der Meeresströmungen	67

einem Atmosphärenmodell in den 1960er Jahren ergaben einen Temperaturanstieg von 2°C bei angenommener Verdoppelung der CO_2 -Konzentration; ein weiteres Modell ergab etwas später einen Wert von 4°C .

In den 1970er Jahren warnte mit der National Academy of Sciences der USA erstmals eine große Wissenschaftsorganisation vor der globalen Erwärmung.³⁴ Gleichzeitig gab es einige wenige Forscher, die sogar eine neue Eiszeit für möglich hielten, unter ihnen der bekannte US-Klimatologe Stephen Schneider. Das Thema wurde von den Medien begierig aufgegriffen; Schneiders Argumente überzeugten Fachleute jedoch kaum, und im Lichte weiterer eigener Forschungsergebnisse revidierte er bald selbst seine Auffassung.

Die National Academy schätzte damals die Wirkung einer CO_2 -Verdoppelung auf eine Zunahme der Temperatur um $1,5$ bis $4,5^{\circ}\text{C}$. Diese Unsicherheitsspanne gilt bis heute (siehe unten); sie konnte unabhängig bestätigt und abgesichert, aber leider bislang nicht wesentlich verkleinert werden – obwohl Werte am Rande dieser Spanne als zunehmend unwahrscheinlich gelten müssen. Im Jahr 1990 erschien der erste Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change³⁵ (IPCC, mehr dazu in Kap. 4), der zweite und dritte Bericht folgten 1996³⁶ und 2001.³⁷ In diesem Zeitraum haben sich die wissenschaftlichen Erkenntnisse derart erhärtet, dass inzwischen fast alle Klimatologen eine spürbare anthropogene Klimaerwärmung für erwiesen oder zumindest hochwahrscheinlich halten.³⁸

Der Treibhauseffekt

Der Grund für den befürchteten Temperaturanstieg als Folge des steigenden CO_2 -Gehalts der Atmosphäre liegt im so genannten Treibhauseffekt, der hier kurz erläutert werden soll.

Die mittlere Temperatur auf der Erde ergibt sich aus einem einfachen Strahlungsgleichgewicht (siehe Kap. 1). Einige Gase in der Atmosphäre greifen in die Strahlungsbilanz ein, indem sie zwar die ankommende Sonnenstrahlung passieren lassen, jedoch nicht die von der Erdoberfläche abgestrahlte langwellige

Wärmestrahlung. Dadurch kann Wärme von der Oberfläche nicht so leicht ins All abgestrahlt werden; es kommt zu einer Art «Wärmestau» in der Nähe der Erdoberfläche.

Anders formuliert: Die Oberfläche strahlt, wie jeder physikalische Körper, Wärme ab – je höher die Temperatur, desto mehr. Diese Wärmestrahlung entweicht aber nicht einfach ins Weltall, sondern wird unterwegs in der Atmosphäre absorbiert, und zwar von den Treibhausgasen (oder «klimawirksamen Gasen» – nicht zu verwechseln mit den «Treibgasen», die in Spraydosen Verwendung fanden und die Ozonschicht schädigen). Die wichtigsten dieser Gase sind Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan. Diese Gase strahlen die absorbierte Wärme wiederum in alle Richtungen gleichmäßig ab – einen Teil also auch zurück zur Erdoberfläche. Dadurch kommt an der Oberfläche mehr Strahlung an als ohne Treibhausgase: nämlich nicht nur die Sonnenstrahlung, sondern zusätzlich die von den Treibhausgasen abgestrahlte Wärmestrahlung. Ein Gleichgewicht kann sich erst wieder einstellen, wenn die Oberfläche zum Ausgleich auch mehr abstrahlt – also wenn sie wärmer ist. Dies ist der Treibhauseffekt (Abb. 2.1).

Der Treibhauseffekt ist ein ganz natürlicher Vorgang – Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan kommen von Natur aus seit jeher in der Atmosphäre vor. Der Treibhauseffekt ist sogar lebensnotwendig – ohne ihn wäre unser Planet völlig gefroren. Eine einfache Rechnung zeigt die Wirkung. Die ankommende Sonnenstrahlung pro Quadratmeter Erdoberfläche beträgt 342 Watt. Etwa 30% davon werden reflektiert, es verbleiben 242 Watt/ m^2 , die teils in der Atmosphäre, teils von Wasser- und Landflächen absorbiert werden. Ein Körper, der diese Strahlungsmenge abstrahlt, hat nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz der Physik eine Temperatur von -18°C ; wenn die Erdoberfläche im Mittel diese Temperatur hätte, würde sie also gerade so viel abstrahlen, wie an Sonnenstrahlung ankommt. Tatsächlich beträgt die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche aber $+15^{\circ}\text{C}$. Die Differenz von 33 Grad wird vom Treibhauseffekt verursacht, der daher erst das lebensfreundliche Klima auf der Erde möglich macht. Der Grund zur Sorge über die globale

Report on Emission Scenarios beschrieben; diese Szenarien sind daher als SRES-Szenarien bekannt.⁵⁷ Sie decken die ganze Bandbreite von ökonomisch plausiblen künftigen Entwicklungen ab. Am pessimistischen Ende findet man eine Vervierfachung der CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2100; die optimistische Variante ist ein moderater weiterer Anstieg, gefolgt von einer allmählichen Abnahme auf einen Bruchteil der heutigen Werte. Explizite Klimaschutzmaßnahmen berücksichtigen diese Szenarien nicht (Klimaschutzstrategien werden wir in Kapitel 5 diskutieren).

Die CO₂-Konzentration steigt in diesen Szenarien bis zum Jahr 2100 auf 540 bis 970 ppm (also ein Anstieg von 90% bis 250% über den vorindustriellen Normalwert von 280 ppm), wenn man annimmt, dass Ozeane und Biosphäre einen unveränderten Anteil unserer Emissionen aufnehmen. Berücksichtigt man noch, dass der Klimawandel auch diese Kohlenstoffaufnahme verändern kann (die so genannte Rückkopplung des Kohlenstoffkreislaufes), dann vergrößert sich diese Spanne auf 490 bis 1260 ppm. Wir sehen also, dass diese Szenarien ein sehr breites Spektrum künftiger Möglichkeiten abdecken. Der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb im Jahr 2100 (alle Treibhausgase und Aerosole) variiert in diesen Szenarien zwischen 4 und 9 Watt/m² – trotz der sehr unterschiedlichen Annahmen über die Emissionen also nur um etwas mehr als einen Faktor zwei.

Um die denkbaren Auswirkungen dieser Szenarien auf die globale Mitteltemperatur zu berechnen, wurden für den letzten IPCC-Bericht Klimamodelle damit angetrieben, die weitgehend die Spanne der Unsicherheit in der Klimasensitivität erfassen (diese Modelle deckten eine Spanne von 1,7 bis 4,2°C ab). Im Ergebnis ergab sich eine Erwärmung um 1,4 bis 5,8°C für den Zeitraum 1990 bis 2100 (Abb. 2.6), wobei die Kommastelle natürlich nicht zu ernst genommen werden sollte. Anders ausgedrückt: Wir müssen ohne Klimaschutzmaßnahmen bis zum Jahr 2100 eine anthropogene Erwärmung um knapp 2°C bis mehr als 6°C über den vorindustriellen Wert hinaus erwarten.⁵⁸

Selbst bei sehr optimistischen Annahmen sowohl über die künftigen Emissionen als auch über die Klimasensitivität wird

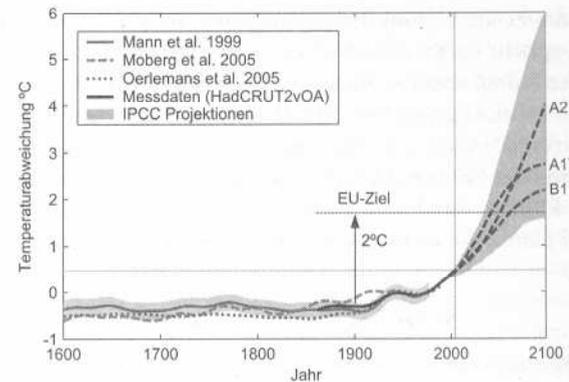


Abb. 2.6: Klimaentwicklung in Vergangenheit und Zukunft. Gezeigt sind die Messdaten der Wetterstationen (globales Mittel) und für die Zukunft die Spanne aller IPCC-Szenarien bis zum Jahr 2100 sowie zur Illustration drei Beispielszenarien (A2, A1T und B2). Selbst im optimistischsten der Szenarien wird die Erwärmung weit über die natürlichen Schwankungen der abgelaufenen Jahrhunderte hinausgehen. Dies gilt unabhängig von der Unsicherheit über den vergangenen Klimaverlauf: Gezeigt sind hierzu die Rekonstruktionen aus Abb. 1.6. Das Ziel der EU-Klimapolitik von maximal 2°C Erwärmung könnte ohne effektive Gegenmaßnahmen bereits in einigen Jahrzehnten überschritten werden.

die Erwärmung insgesamt also mindestens das Dreifache dessen betragen, was wir bislang im 20. Jahrhundert erlebt haben. Unser Klima wird Temperaturen erreichen, wie es sie wahrscheinlich seit mindestens 100 000 Jahren nicht auf der Erde gegeben hat. Im pessimistischen Fall dagegen werden wir die mittlere Temperatur der Erde von ca. 15°C auf über 20°C erhöhen – eine Erwärmung, die wohl selbst über viele Jahrmillionen einzigartig wäre.

Könnte es noch schlimmer kommen? Wenn auch nach gegenwärtigem Kenntnisstand nicht sehr wahrscheinlich, ist leider auch dies nicht ausgeschlossen – neuere Studien, die seit der Publikation des letzten IPCC-Berichts durchgeführt wurden, deuten auf die Gefahr einer größeren Freisetzung von CO₂ aus der Biosphäre infolge der Erwärmung hin. Dadurch würde die Konzentration auf noch höhere Werte steigen, und sogar eine globale Erwärmung um 7 oder 8°C wäre möglich.⁵⁹

globalen Mittel 0,25 %) schwankt deshalb sehr stark von Ort zu Ort und von Stunde zu Stunde – ganz im Gegensatz zu den oben diskutierten langlebigen Treibhausgasen, die sich während ihrer Lebensdauer um den ganzen Erdball verteilen und daher überall fast die gleiche Konzentration haben.

Seit jeher treiben Klimaforscher daher großen Aufwand, um den Wasserkreislauf immer besser zu verstehen und genauer in ihren Modellen zu erfassen – das ist nicht nur wegen der Treibhauswirkung des Wasserdampfes wichtig, sondern vor allem auch zur Berechnung der Niederschlagsverteilung.

Die Wasserdampfkonzentration hängt stark von der Temperatur ab. Warme Luft kann nach dem Clausius-Clapeyron-Gesetz der Physik mehr Wasserdampf halten. Daher erhöht der Mensch indirekt auch die Wasserdampfkonzentration der Atmosphäre, wenn er das Klima aufheizt. Dies ist eine klassische verstärkende Rückkopplung, da eine höhere Wasserdampfkonzentration wiederum die Erwärmung verstärkt.

Der Anstieg der Temperatur

Messdaten aus aller Welt belegen, dass neben der Kohlendioxidkonzentration auch die mittlere Temperatur in den abgelaufenen hundert Jahren deutlich gestiegen ist – und zwar etwa in dem Maße, wie es nach unserem physikalischen Verständnis des Treibhauseffekts auch zu erwarten ist.

Dieser Anstieg der Temperatur ist durch eine Reihe voneinander unabhängiger Datensätze belegt. Die wichtigste Datenbasis sind die Messwerte der weltweiten Wetterstationen (Abb. 2.3, 2.4), die seit dem Jahr 1900 einen globalen Anstieg um 0,7 °C zeigen.³⁷ Dabei sind lokale Effekte, vor allem das Wachsen von Städten um Wetterstationen herum (der *urban heat island effect*), bereits herauskorrigiert. Dass diese Korrektur erfolgreich und vollständig ist, wurde kürzlich nochmals getestet, indem stürmische Tage mit windstillen Tagen verglichen wurden; nur bei Letzteren wäre der Wärmeinsel-Effekt spürbar. Beide zeigen jedoch genau den gleichen Erwärmungstrend.⁴³

Ein anderer wichtiger Datensatz sind die Messungen der

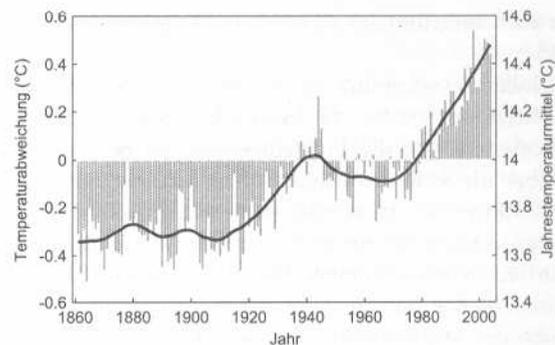


Abb. 2.3: Verlauf der global gemittelten Temperaturen 1861–2004, gemessen von Wetterstationen. Gezeigt sind jährliche Werte (graue Balken) sowie der über elf Jahre geglättete Verlauf (Kurve). (Quelle: Hadley Centre⁴⁴)

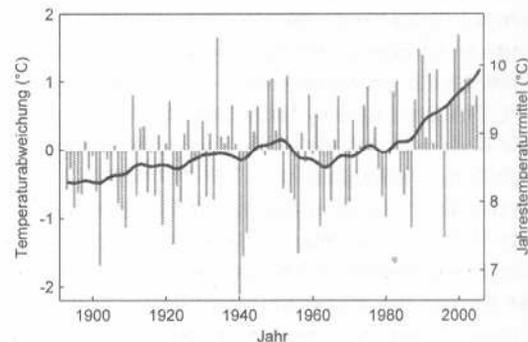


Abb. 2.4: Verlauf der Temperatur an der Wetterstation auf dem Potsdamer Telegrafenberg 1893–2005, eine der längsten ununterbrochenen Messreihen der Erde. Gezeigt sind jährliche Werte (graue Balken) sowie der über elf Jahre geglättete Verlauf (Kurve). Der Erwärmungstrend ist hier etwas stärker als im globalen Mittel; außerdem sind die jährlichen Schwankungen erheblich größer, so wie es bei einer Einzelstation im Vergleich zum globalen Mittel zu erwarten ist. (Quelle: Sekularstation Potsdam⁴⁵)

Meerestemperaturen, die von einem großen Netz von Schiffen durchgeführt werden. Diese zeigen einen Anstieg der Oberflächentemperatur der Meere, der ganz ähnlich verläuft wie über den Kontinenten.³⁷ Der Trend ist etwas schwächer, wie