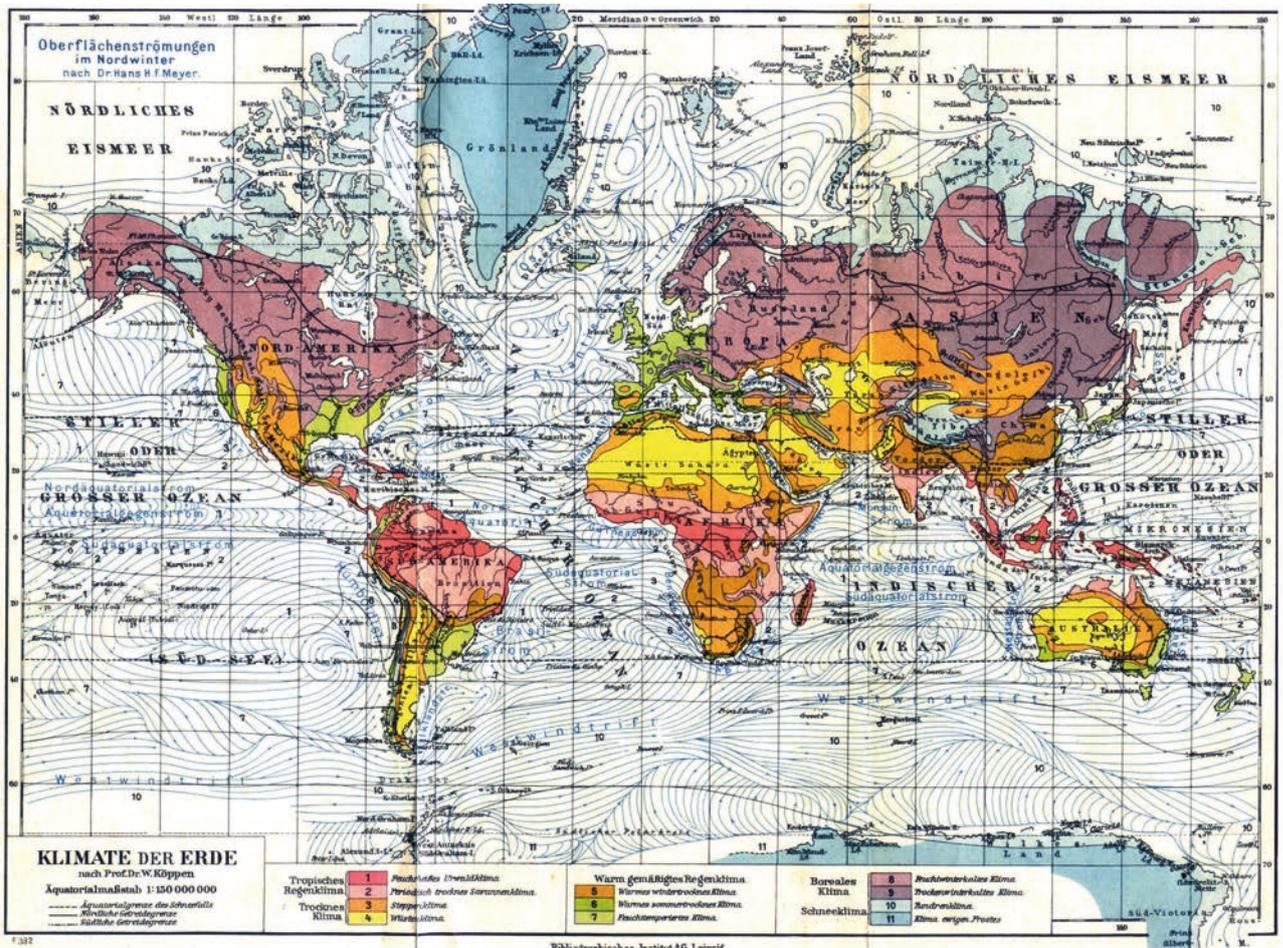


koeppen-geiger.vu-wien.ac.at



Klimaforschung und -wandel

Wie der Klimawandel in Wissenschaft und Politik gelangte

Matthias Heymann

In der Wissenschaft war der Treibhauseffekt schon am Ende des 19. Jahrhunderts bekannt, Beobachtungen in den 1930er-Jahren deuteten darauf hin, dass die globalen Temperaturen ansteigen. Trotzdem war der Weg von der klassischen Klimatologie zur modernen Klimawissenschaft lang und von gesellschaftlichen, politischen und technischen Entwicklungen entscheidend beeinflusst.

Bereits 1896 sagte der schwedische Physiker Svante Arrhenius wegen des rasch wachsenden Kohleverbrauchs und der damit verbundenen Kohlendioxidemissionen steigende globale Temperaturen voraus. Zu diesem Zeitpunkt stieß diese Erkenntnis jedoch auf wenig Interesse. Etwa vierzig Jahre später beobachteten Meteorologen tatsächlich einen signifikanten Anstieg der Temperaturen in Europa, der in der Arktis besonders ausgeprägt

war. Der englische Ingenieur Guy Callendar versuchte 1938 durch umfangreiche Berechnungen nachzuweisen, dass der Treibhauseffekt diesen Anstieg verursacht haben könnte (Abb. 1). Zu seiner Überraschung traf seine Theorie in der Meteorologie und Klimatologie auf große Skepsis. Möglich schienen auch zufällige Verschiebungen der globalen Windzirkulation als Ursache für den Temperaturanstieg.

Es dauerte weitere vier Jahrzehnte, bis weiterhin steigende Kohlendioxidemissionen ernsthafte Befürchtungen über eine Klimaerwärmung verursachten und zu einem Politikum wurden. Paradoxerweise wandelte sich diese Wahrnehmung zu einem Zeitpunkt, als die Entwicklung der globalen mittleren Temperaturen seit rund drei Jahrzehnten wieder stagnierte. Beobachtungen wiesen also keineswegs auf einen Klimawandel wie in den 1930er-Jahren hin. Was verursachte also die plötzliche Sorge über einen Klimawandel? Und warum erhielten die Klimawissen-

◀ Die Definition von Klimatypen und die Entwicklung einer Klimakarte der Erde (hier von 1931) durch Wladimir Köppen prägt die Klimaforschung bis heute.

schaften in den folgenden Jahrzehnten hohe politische Priorität, nicht aber vierzig Jahre zuvor? Dieser Beitrag versucht, Antworten auf diese Fragen zu geben.

Die Tradition der „klassischen Klimatologie“

Das Interesse am Klima reicht weit zurück. Griechische Philosophen wie Parmenides, Eratosthenes, Aristotle und Hippokrates verstanden unter dem griechischen Wort κλίμα (klíma) den Winkel der Sonneneinstrahlung. Seefahrer und Reisende berichteten in den folgenden Jahrhunderten über die Verschiedenheit von Klimata auf dem Globus und zeigten, dass nicht der Sonnenwinkel allein das Klima bestimmte. Jahreszeiten, Wetter, Windströmungen und terrestrische Verhältnisse wie Entfernung von den Ozeanen und die Höhe über dem Meer machten das Klima zu einem weitaus komplexeren Phänomen. Eine wissenschaftliche Klimatologie entstand im Laufe des 19. Jahrhunderts.

Wissenschaftler wie der Naturforscher Alexander von Humboldt, der Direktor der Zentralanstalt für Meteorologie in Wien, Julius von Hann, und der Leiter des damals neu geschaffenen Seewetterdienstes an der Deutschen Seewarte in Hamburg, Wladimir Köppen, trugen maßgeblich dazu bei, die Klimatologie zu einer wissenschaftlichen Disziplin zu machen. Humboldt verstand unter Klima „alle Veränderungen in der Atmosphäre, die unsre Organe merklich afficiren“, also die Temperatur, die Feuchtigkeit oder die Luftbewegungen. Danach bezog sich Klima immer auf einen bestimmten Ort oder eine bestimmte Region, so wie wir noch heute von dem Klima von Hamburg oder München sprechen. Außerdem bezog es sich lediglich auf die Oberfläche der Erde und nicht auf die gesamte Atmosphäre. Von Hann veröffentlichte 1883 das „Handbuch der Klimatologie“, in dem er die methodischen Grundlagen der Disziplin zusammenfasste. Danach ließ sich das Klima eines Ortes durch die Mittelwertbildung von Messreihen atmosphärischer Größen bestimmen, darunter die mittlere monatliche und jährliche Temperatur.

Eine Hauptaufgabe der Klimatologie bestand darin, die verschiedenen Klimata der Erde zu beobachten und auf Basis meteorologischer Messreihen zu beschreiben. Eine andere Aufgabe war die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Klima und Pflanzen- und Tierwelt und den Menschen, insbesondere die Bedeutung des Klimas für die Verbreitung von Krankheiten oder für die Land- und Forstwirtschaft. In dieser Konzeption war die Klimatologie vor allem eine empirische Wissenschaft, die sich für geographische Unterschiede des Klimas interessierte, das Klima eines Ortes aber als mehr oder weniger konstant über lange Zeiträume betrachtete. Ein berühmtes Resultat war die Definition von Klimatypen und die Entwicklung einer Klimakarte der Erde durch Wladimir Köppen, die noch

heute Anwendung findet (Abb. linke Seite). Dies wurde später oft als „klassische Klimatologie“ bezeichnet. Vertreter dieser an empirischer Sorgfalt, Detail und Vollständigkeit ausgerichteten, klassischen Klimatologie konnten wenig mit den Berechnungen von Arrhenius oder Callendar anfangen. In ihrem Weltbild ergab es keinen Sinn, pauschal weltweit gemittelte Temperaturveränderungen zu berechnen, ohne regionale Wetterphänomene und geographische Variationen und Besonderheiten des Klimas zu berücksichtigen. Überdies hatten sie in mathematische Formeln und vereinfachte globale Berechnungen wenig Vertrauen, zumindest in Hinsicht auf die komplexen Phänomene der Atmosphäre, die bisher noch kein Theoretiker vollständig erfassen und berechnen konnte.

Technischer Wandel und veränderter Klimabegriff

Der lange Weg von der klassischen Klimatologie zur modernen Klimawissenschaft verlief nicht linear. Bereits von Hann und Köppen befürworteten und förderten meteorologische Messungen in höheren Luftschichten, denn offensichtlich hing der Zustand in Bodennähe auch von Prozessen in größeren Höhen ab. Zunächst standen dafür nur wenige Bergstationen und Heißluftballone zur Verfügung, am Ende des 19. Jahrhunderts kamen auch Drachen (Abb. 2) und spezielle, mit Wasserstoff gefüllte Ballons zum Einsatz. Diese oft als „Entdeckung der dritten Dimension“ der Atmosphäre bezeichnete Richtung, die Köppen auf den Namen „Aerologie“ taufte, hatte handfeste praktische Gründe. Neue Luftschiffe und Flugzeuge, die um die Jahrhundertwende gebaut wurden, waren empfindliche Geräte, deren Steuerung eine gute Kenntnis des Wetters in höheren Luftschichten erforderte.

Der Erste Weltkrieg beschleunigte diese Entwicklung. Seit Ende der 1930er-Jahre standen überdies neue Radiosonden zur Verfügung, die meteorologische Messungen mithilfe von Radiowellen direkt an die Bodenstation senden und die Erforschung höherer Schichten der Atmosphäre deutlich erleichtern konnten. Führten die Wetterdienste um 1930 weltweit etwa 3000 Aufstiege von Drachen oder Ballons durch, so stieg diese Zahl auf etwa 180 000 um 1950. Das wachsende Wissen über höhere Luftschichten verdeutlichte auch die Bedeutung von Höhenwinden und großräumigen

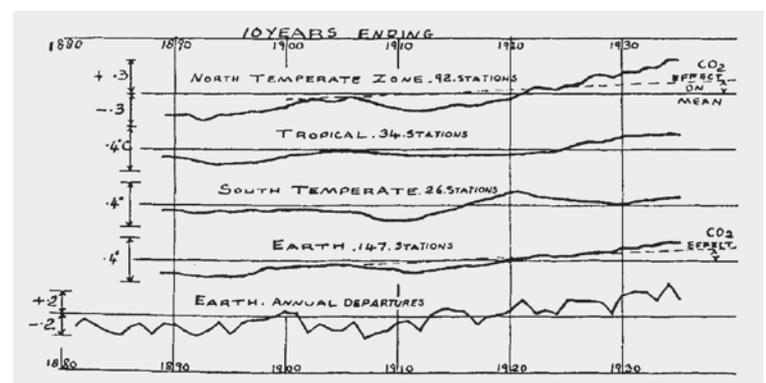


Abb. 1 Die Berechnungen des Temperaturanstiegs durch den Treibhauseffekt von Guy Callendar stießen in Meteorologie und Klimatologie auf Skepsis.

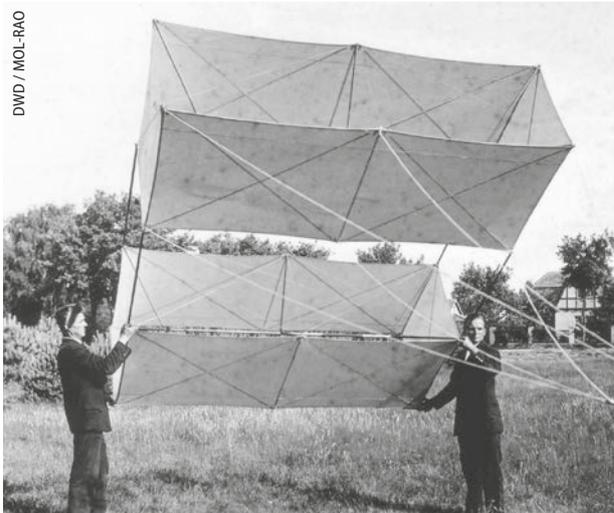


Abb. 2 Wetterdrachen ermöglichten es seit Ende des 19. Jahrhunderts, höhere Atmosphärenschichten zu erforschen.

Wettersystemen und die Abhängigkeit lokaler Klimata und Klimaereignisse von Prozessen, die kontinentale Ausmaße haben konnten. Ein Beispiel dafür sind Verschiebungen und Veränderungen von Monsunzonen und -niederschlägen, die sich mithilfe dieser Erkenntnisse besser verstehen ließen. Der führende deutsche Klimatologe Hermann Flohn bezeichnete diese erweiterte Ausrichtung des Faches als „moderne Klimatologie“.

Die langfristig größten Veränderungen in der Klimatologie sollten Durchbrüche in der Physik der Atmosphäre bringen. Lange trugen Meteorologie und Klimatologie den Makel, lediglich empirische Disziplinen und keine vollwertigen Wissenschaften zu sein, weil es ihnen an leistungsfähigen physikalischen Theorien mangelte. Diesen Makel suchte der norwegische Physiker Vilhelm Bjerknes zu überwinden. 1903 gelang es ihm, eine neue Basis für die „dynamische Meteorologie“ zu schaffen. Er entwickelte ein komplexes System aus sieben nichtlinearen partiellen Differenzialgleichungen, die den Zustand der Atmosphäre

im Prinzip für jeden Punkt in Zeit und Raum beschrieben. Diese sieben Gleichungen repräsentierten die relevanten physikalischen Gesetzmäßigkeiten und beinhalteten Bewegungsgleichungen für den horizontalen Wind, die hydrostatische Grundgleichung, die Massenerhaltungsgleichung, die Energieerhaltungsgleichung und das ideale Gasgesetz. Paradoxerweise wurden diese komplexen Gleichungen später als „primitive Gleichungen“ bezeichnet.

Bjerknes selbst erkannte, dass dieses Gleichungssystem die Grundlage für Vorhersagen von Wetter und Klima bilden könnte. Ein entscheidendes Problem bestand allerdings darin, dass es für diese Gleichungen keine analytischen Lösungen gab. Der britische Physiker, Mathematiker und Meteorologe Lewis Fry Richardson war der erste, der sich um eine numerische Näherungslösung dieser Gleichungen bemühte. Dafür musste er für Rasterelemente und Zeitintervalle angenäherte Werte sehr aufwändig berechnen. Er führte diese Arbeit probenhalber für eine Wettervorhersage für einen Tag und zwei Rasterelemente durch. Für praktische Zwecke war dies viel zu aufwändig. Richardsons Schätzungen nach erforderte eine ausreichend schnell berechnete Wettervorhersage eine „forecast factory“ von 64 000 menschlichen Rechnern.

Die Atmosphäre im Computer

Dramatische politische Konflikte im 20. Jahrhundert, der Zweite Weltkrieg und der Kalte Krieg, dienten als Geburtshelfer, um die von Bjerknes formulierte Vision der Wetter- und Klimavorhersage zu realisieren. Im Zweiten Weltkrieg entstanden digitale Computer, technische Rechner, um ballistische Trajektorien für das amerikanische Militär zu errechnen. Nach dem Krieg erkannten der Mathematiker John von Neumann und der Meteorologe Carl-Gustav Rossby die sich bietenden Gelegenheiten. Digitale Computer, die bis zu 5000 Rechenoperationen pro Sekunde ausführten, könnten auch der Meteorologie nutzen (**Abb. 3**). Außerdem brachte der Kalte Krieg einen warmen Regen militärischer Forschungsmittel. Von Neumann und Ross-



Dem britischen Naturforscher **John Tyndall** gelingt es mittels präziser Messungen, einige für den Treibhauseffekt verantwortliche Gase wie Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid zu identifizieren.



Der britische Ingenieur **Guy Callendar** versucht ab 1938 durch umfangreiche Berechnungen nachzuweisen, dass ein auffälliger Temperaturanstieg in der nördlichen Hemisphäre zwischen 1925 und 1940 durch den Treibhauseffekt verursacht worden sein könnte.



Der amerikanische Chemiker **Charles David Keeling** nimmt Messungen der CO₂-Konzentration der Atmosphäre auf dem Vulkanberg Mauna Loa auf Hawaii auf. Wenige Jahre später weist er nach, dass die CO₂-Konzentration Jahr für Jahr ansteigt.

1824

1862

1896

1938

1956

1957



Der französische Mathematiker und Physiker **Joseph Fourier** entdeckt den Treibhauseffekt, bei dem Gase in der Atmosphäre einfallende Wärmestrahlung der Sonne daran hindern, in den Weltraum reflektiert zu werden.



Der schwedische Physiker und Chemiker **Svante Arrhenius** berechnet erstmals die Erwärmung der Erde durch den Treibhauseffekt. Eine Verdopplung der CO₂-Konzentrationen würde demnach eine Erwärmung von 5 bis 6 °C verursachen.



Dem amerikanischen Meteorologen **Norman Phillips** gelingt es erstmals erfolgreich, die globale Zirkulation mit einem Computermodell zu simulieren. Sein Modell ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung von Klimamodellen.

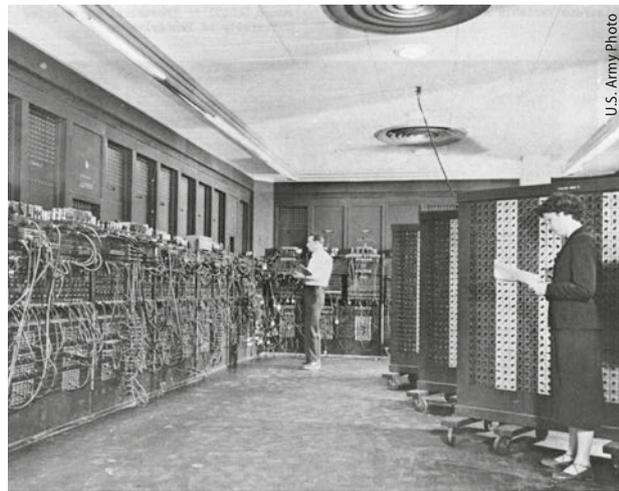
University of East Anglia (Callendar); MIT Museum (Phillips); Scripps Institution of Oceanography Photographic Laboratory Collection (Keeling)

by versprochen kühn nicht nur, Wetter und Klima vorherzusagen, sondern auch gezielt zu manipulieren.

Diese Versprechen stießen auf großes politisches Interesse, die Forschungsrealität sah aber sehr viel bescheidener aus. Rossby und sein Mitarbeiter Jule Charney, der schließlich ein junges Entwicklungsteam in Princeton leitete, mussten drastische und kontroverse Vereinfachungen an den primitiven Gleichungen vornehmen, um den Aufwand der numerischen Lösungsverfahren der begrenzten Kapazität erster digitaler Computer anzupassen. Charneys Team entwickelte ein Modell der Atmosphäre für den Computer, eine virtuelle Atmosphäre, mit der Experimente in Form von Simulationen durchführbar waren. 1950 gelang tatsächlich die erste experimentelle Wettervorhersage, trotz aller Vereinfachungen mit sehr ermutigenden Ergebnissen. Die sogenannte numerische Wettervorhersage wurde ab Mitte der 1950er-Jahre operationell von ersten Wetterdiensten in Schweden und den USA eingesetzt und in den folgenden Jahren und Jahrzehnten weltweit zum Standard.

Das Experimentieren auf dem Computer entwickelte sich zu einem leistungsfähigen Instrument, zumal mit der realen Atmosphäre keine Experimente möglich waren. Ein junger Mitarbeiter aus Charneys Team, Norman Phillips, wagte 1955 die Simulation der Windströmungen in der Atmosphäre über einen deutlich längeren Zeitraum als die ein bis zwei Tage, für welche die Wettervorhersage zu simulieren war. Mit weiteren drastischen Vereinfachungen, etwa der Annahme einer ruhenden Atmosphäre zu Beginn der Simulation, ließ Phillips den Computer über 30 virtuelle Tage laufen. Das Ergebnis übertraf die kühnsten Träume. Phillips konnte damit die Strömungsmuster der irdischen Atmosphäre erstaunlich gut reproduzieren. Dieses Ergebnis verursachte beträchtlichen Enthusiasmus, denn es legte nahe, dass die komplexe Physik der Atmosphäre mithilfe von Computermodellen und Simulationen zu bewältigen ist.

Das Modell von Phillips lässt sich als erstes „Global Circulation Model“ (GCM) ansehen, ein Modelltyp, den in den 1950er- und 1960er-Jahren zunächst vier Forschungsgruppen in den USA und eine in Großbritannien weiter-



U.S. Army Photo

Abb. 3 Die zunächst für militärische Anwendungen gedachten frühen Computer fanden nach dem Zweiten Weltkrieg rasch Einsatz in der Meteorologie.

entwickelten, um Klimaprozesse besser zu erfassen und zu simulieren. Diese neue Klimawissenschaft veränderte die Forschung radikal. Sie erforderte Fachleute aus Physik, Mathematik, theoretischer Meteorologie und Computertechnik, die zunehmend den Typus des Klimaforschers repräsentierten, während traditionell orientierte empirische Klimatologen rasch an Bedeutung verloren.

Mit dieser neuen, nicht mehr geographischen, sondern rein physikalischen Klimawissenschaft veränderte sich auch das Verständnis von Klima selbst auf radikale Weise. Das Klima eines Ortes der alten Klimatologie war nunmehr wenig sinnvoll, denn die Klimamodelle – wie sie bald genannt wurden – kannten nur großräumige Rasterelemente von zunächst mehreren tausend Kilometern Seitenlänge, auf denen sich näherungsweise gemittelte Ergebnisse simulieren ließen. Das Klima selbst wurde damit zu einem sehr großräumigen, globalen Phänomen, während kleinräumige Daten und Phänomene sozusagen durch das Raster der Modelle fielen. Auch die Prioritäten veränderten sich.



Auf der Study Conference on Critical Environmental Problems (SCEP) wird erstmals die Klimaerwärmung von Atmosphärenwissenschaftlern als ernsthaftes Zukunftsproblem beschrieben. Der amerikanische Meteorologe **William Welch Kellogg** fordert den Einsatz von Klimamodellen für die Klimavorhersage.



Der amerikanische Klimaforscher **James E. Hansen** veröffentlicht erstmals mit einem einfachen Klimamodell simulierte Projektionen, nach denen bis zum Jahr 2100 die globale Erwärmung zwischen 1 und 4 °C liegen wird.

1965



Der japanische Meteorologe und Klimamodellierer **Syukuro Manabe** führt erstmals ein Experiment zur Erderwärmung mit einem Klimamodell durch. Bei Verdopplung der CO₂-Konzentration der Atmosphäre ergeben die Simulationen eine globale Erwärmung von etwa 2 °C.

1970

1979

Ein Bericht der amerikanischen National Academy of Science schließt auf Basis von Experimenten mit zwei Klimamodellen, dass es „keinen Grund gibt, Klimaveränderungen zu bezweifeln und zu glauben, dass diese Klimaveränderungen vernachlässigbar sein werden“.

1981



1988

Das **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** wird als zwischenstaatliche Beratungsorganisation gegründet und veröffentlicht Zukunftsprojektionen mit Klimamodellen, welche die Klimaerwärmung und die Gefahren des Klimawandels bestätigen.

Während die klassische Klimatologie an möglichst differenzierten räumlichen Bestimmungen geographischer Klimata interessiert war, stand nun eher die zeitliche Dynamik von Prozessen und Veränderungen des Klimas im Vordergrund.

Globale Erwärmung und neue Perspektiven

Bis zum Ende der 1960er-Jahre hatte sich die Klimamodellierung, nicht zuletzt mithilfe dramatisch steigender Leistungsfähigkeit der Computer, zu einem führenden Instrument der Forschung entwickelt. Die bereits seit langem bekannte Frage des Treibhauseffekts spielte in den frühen Modellierungen aber praktisch keine Rolle. Zwar hatten einige wenige Forscher wie der Physiker Gilbert Plass oder der Ozeanograph Roger Revelle diese Frage seit den 1950er-Jahren in den Blick genommen, aber ohne damit größere Aufmerksamkeit zu erzeugen. Revelle veranlasste Ende der 1950er-Jahre sogar erstmals kontinuierliche Messungen atmosphärischen Kohlendioxids durch den Chemiker Charles Keeling auf Hawaii, um steigende Konzentrationen des Gases in der Atmosphäre nachzuweisen, was in der Tat innerhalb weniger Jahre gelang (**Abb. 4**).

1965 behandelte erstmals eine Konferenz in den USA das Thema der Klimaerwärmung durch den Treibhauseffekt. Auch ein Bericht des Scientific Advisory Committee des US-Präsidenten wies in diesem Jahr auf den Treibhauseffekt hin, der weiter zu beobachten sei. Dabei handelte es sich nicht um sorgenvolle Darstellungen, die auf dringende Maßnahmen drängten. Im Vordergrund stand nach wie vor das politische Interesse an der Entwicklung gezielter Wetter- und Klimaveränderungen mit technischen Mitteln.

Erst das in dieser Zeit wachsende Umweltbewusstsein und die Entstehung einer lautstarken Umweltbewegung veränderten die Perspektive grundlegend. Ein Verständnis der Natur als eine für den Menschen beliebig verfügbare Ressource wurde zunehmend durch das Verständnis einer von den Menschen verschmutzten, gefährdeten und zu schützenden Umwelt ersetzt. Dieser Perspektivwechsel sollte auch die Klimawissenschaft nachhaltig verändern. Klimaveränderungen gerieten immer mehr in den Blick als ein ernsthaftes, die menschliche Gesellschaft gefähr-

denes Problem. Dabei gab es zunächst sowohl warnende Stimmen, die das Risiko einer Abkühlung und zukünftiger Eiszeiten betonten, zumindest bis Mitte der 1970er-Jahre, als auch Stimmen, die das Risiko einer zukünftigen Klimaerwärmung betonten. Letztere sollten rasch die Oberhand erlangen.

Die aufkeimende Sorge vor einem Klimawandel während einer Zeit, in der die globalen Temperaturen stagnierten, also empirische Anzeichen für einen solchen Klimawandel fehlten, ist ein deutliches Beispiel dafür, wie stark gesellschaftliche Aufmerksamkeiten wissenschaftliche Interessen beeinflussen. Denn die physikalischen Ursachen für eine mögliche Erwärmung waren ebenso wie die astronomischen und geologischen Gründe für eine mögliche Abkühlung und zukünftige Eiszeit seit Langem bekannt. Klimamodelle erhielten nun eine zentrale Rolle und bestärkten die Sorgen einer Klimaerwärmung nachhaltig. Erste Simulationsexperimente mit erhöhten Kohlendioxidkonzentrationen der virtuellen Modell-Atmosphäre sagten eine deutliche Erwärmung voraus, wenn diese auch erst nach mehreren Jahrzehnten deutlich spürbar werden sollte.

Einige Vertreter einer neuen Generation von Klimamodellierern forderten lautstark, Klimamodelle trotz der eingeräumten Unsicherheiten systematisch als Prognoseinstrumente zu verwenden, um eine Basis für rasche politische Entscheidungen über Maßnahmen gegen den befürchteten Klimawandel zu schaffen. Dazu zählte der junge Klimawissenschaftler und Umweltaktivist Stephen H. Schneider, der in Büchern und Talkshows eindringlich vor möglichen „Klimakatastrophen“ warnte und maßgeblich zur Politisierung der Klimawissenschaft beitrug.

Ein anderer Klimamodellierer derselben Generation, James E. Hansen, entwickelte in den 1970er-Jahren gezielt ein einfaches Modell für die Anwendung zur Simulation sogenannter Klimaprojektionen, die Berechnung zukünftiger Temperaturen in Abhängigkeit unterschiedlicher Emissionsszenarien. 1981 legte sein Team eine erste Veröffentlichung solcher Projektionen in der Zeitschrift *Science* vor, die auch in öffentlichen Medien Aufmerksamkeit erhielt. Das Modell sagte bis zum Jahr 2100 eine durchschnittliche Erwärmung zwischen ein und vier Grad Celsius voraus. Die *New York Times* berichtete auf der Titelseite, dass nach dieser Studie die Welt wärmer würde und der Meeresspiegel zukünftig steigen könnte.

Wegen der großen Unsicherheiten brachte diese Arbeit Hansen erhebliche Kritik ein. Die meisten Wissenschaftler sahen in seinen Projektionen eher eine Wette auf die Zukunft als seriöse Wissenschaft. Doch Hansen hatte den Weg gewiesen, wie der Klimawandel mittels Modellen zu untersuchen war. Nach Gründung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), im Deutschen auch als Weltklimarat bezeichnet, wurde genau dieser Weg mit verfeinerten und komplexeren Modellen beschriftet, die seit den 1980er-Jahren zu Erdsystemmodellen wurden und Rückkopplungen der Atmosphäre mit den Ozeanen, der Biosphäre und anderen geologischen Prozessen berücksichtigten, die für die Entwicklung des Klimas eine wichtige Rolle spielen.

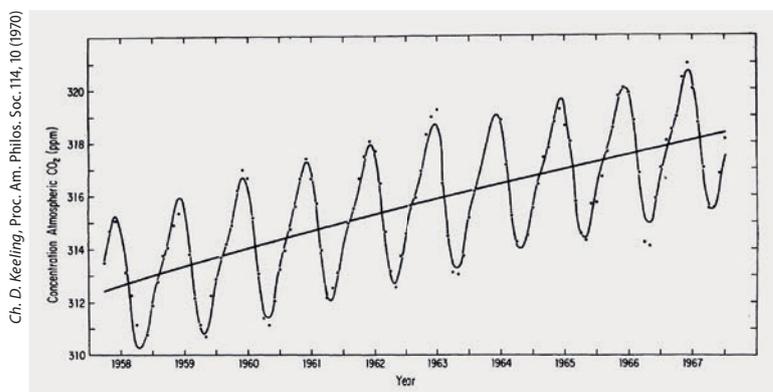


Abb. 4 Die Keeling-Kurve aus dem Jahr 1970 zeigt die Variation der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre seit Ende der 1950er-Jahre. Das auffällige Sägezahnmuster resultiert aus den jahreszeitlichen Unterschieden des Wachstums von Pflanzen und Bäumen.

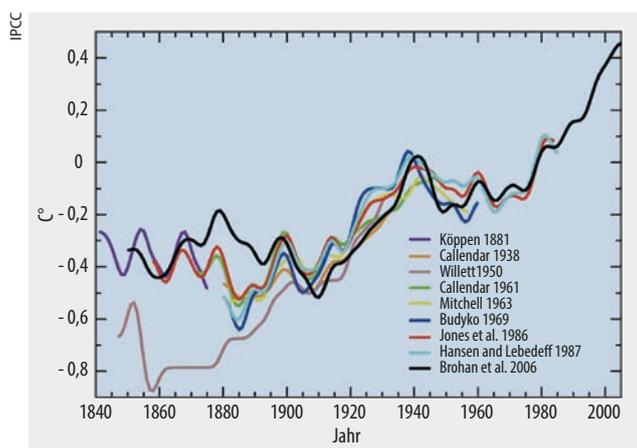


Abb. 5 Historische wie aktuelle Messreihen belegen einen Anstieg der globalen Temperatur.

Eine neue wissenschaftliche Kultur

Klimamodelle und -simulationen sind heute die zentralen Bausteine der Klimawissenschaften. Sie repräsentieren eine Synthese des aktuellen Wissens über Klimaprozesse und leiten gleichzeitig die weitere Forschung. Diese erhielten ihren Status trotz der weiterhin schwer einschätzbaren Unsicherheiten, die vor allem in den 1990er-Jahren erhebliche, oft politisch motivierte Kritik verursachte und von Leugnern des Klimawandels und Vertretern industrieller Interessen politisch instrumentalisiert wurden. Klimamodelle galten jedoch als zu wichtig, um auf ihre Anwendung verzichten zu können. Die Kritik an ihnen ist in den letzten Jahren überdies deutlich zurückgegangen, wengleich nicht ihre Unsicherheiten. Klimamodelle gelten als deutlich besser, differenzierter und zuverlässiger als ihre einfachen Vorgänger und werden heute von Tausenden von Wissenschaftlern getestet, verglichen, überprüft und verbessert.

Außerdem bestätigen zwei weitere Säulen der Klimawissenschaft die aus Modellen nahegelegte Erkenntnis eines anthropogenen Klimawandels. Messungen globaler Temperaturen zeigen eindeutig einen signifikanten Anstieg seit Ende der 1970er-Jahre. Im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten ist die globale Durchschnittstemperatur bereits um 1,1 °C angewachsen (**Abb. 5**). Schließlich hat die Paläoklimatologie, die Untersuchung von Klimaveränderungen in der Erdgeschichte, eindeutig bewiesen, dass steigende Treibhausgaskonzentrationen in der Vergangenheit mit steigenden Temperaturen und anderen Klimaveränderungen verknüpft waren. Paläoklimatologen haben sogar gefährliche Umkehrpunkte entdeckt, mit denen eine drastische Beschleunigung von Klimaveränderungen einherging, ein Warnzeichen für die Zukunft, welches die Sorgen der Klimawissenschaft deutlich vergrößerte.

Anthropogene Klimaveränderungen sind heute so gut nachgewiesen, dass zufällige Fluktuationen als Ursache der Erwärmung auszuschließen sind. James Hansen hat seine kühne Wette von 1981 sozusagen gewonnen. Die neuesten Klimaprojektionen zeigen nahezu exakt den gleichen Verlauf der globalen Temperatur, den bereits Hansen vorhergesagt hatte, nämlich eine Erwärmung von bis zu vier Grad Celsius bis 2100. Eine nicht minder drastische Veränderung

der Klimawissenschaft besteht darin, dass sie eine stark politisierte, in der Öffentlichkeit aufmerksam wahrgenommene Disziplin geworden ist. Sie hat durch die enorme Aufmerksamkeit immens profitiert und ist durch eine Vervielfachung von Mitteln, Instituten, Forschungsstellen, Großcomputern und technischer Infrastruktur zu einer „Big Science“ geworden. Gleichzeitig hat sie allerdings beträchtlich an Autonomie verloren. Der wissenschaftliche Fokus liegt auf der Berechnung von neuen Klimaprojektionen, unter anderem für den IPCC und nationale Regierungen. Viel Zeit geht damit in die Anwendung der Modelle, während weniger Zeit für Grundlagenforschung zur Verfügung steht.

In den letzten Jahren hat sich das unerwartete Resultat gezeigt, dass Bemühungen zur Optimierung der Modelle, etwa die detailliertere Berücksichtigung und bessere Beschreibung von Prozessen und Daten höherer Qualität, die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse nicht mehr wesentlich verbessert hat. Außerdem war bereits seit den 1990er-Jahren erkennbar, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zwar das Klima immer besser verstehen, aber die Erdsystemmodelle und Simulationen sich als immer undurchschaubarer erwiesen. Manche Klimawissenschaftler*innen wie der Direktor des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg, Bjorn Stevens, oder die Forschungsdirektorin des französischen CNRS, Sandrine Bony, stellen deshalb den eingeschlagenen Weg der zunehmenden Weiterentwicklung und Anwendung bestehender Modelle infrage und drängen auf die Rückkehr zu einer detaillierteren Untersuchung grundlegender Klimaprozesse, um diese besser zu verstehen.

Weiterführende Literatur

- *P. N. Edwards, A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, MIT Press, Cambridge, MA (2010)
- *S. R. Weart, The Discovery of Global Warming*, überarb. und erw. Aufl., Harvard University Press, Cambridge (2008), Web-Version: www.aip.org/history/climate/index.htm
- *M. Heymann*, *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* **1**, 581 (2010), <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcc.61/full>
- *M. Heymann und A. Dahan, J. Adv. Model. Earth Syst.* **11**, 1139 (2019), <https://doi.org/10.1029/2018MS001526>

Der Autor



Matthias Heymann ist Professor für Wissenschafts- und Technikgeschichte an der Universität Aarhus in Dänemark. Nach dem Studium der Physik und Philosophie wollte er nicht nur Details der Natur verstehen, sondern vor allem die Menschen, die die Wissenschaft betreiben, Erkenntnisse technisch nutzen und Probleme schaffen und mithilfe der Wissenschaft lösen wollen. Umweltprobleme und die Frage, wie und warum es zu diesen kommen konnte und wie Wissenschaftler und Ingenieure darauf reagierten, fanden sein Hauptinteresse. Den Anfang machte er mit einer Doktorarbeit am Deutschen Museum über die Geschichte der Windenergienutzung im 20. Jahrhundert, bevor er über Stationen in Stuttgart, Istanbul, München und zuletzt Aarhus sich zunehmend der Geschichte der Luftverschmutzung und des Klimawandels und ihrer Erforschung zuwandte.

Prof. Dr. Matthias Heymann, Centre Science Studies, Aarhus University, Ny Munkegade 120, 8000 Aarhus C, Dänemark