

# Sehenden Auges ins Treibhaus geraten

## Ein Streifzug durch die erstaunliche Geschichte der Klimaforschung

Von Marie-Luise Beck und Jochem Marotzke

Warum es der Menschheit so schwer fällt, den Klimawandel aufzuhalten – auch wenn er sich seit Langem abzeichnet.

**D**as vielleicht Erstaunlichste an der Geschichte der Klimaforschung: Die physikalischen Grundprinzipien der Erderwärmung (Abb. 1) sind seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert bekannt, der Treibhauseffekt sogar schon seit 1824. Und dennoch bleiben die Erfolge der Klimapolitik stark hinter dem zurück, was nach dem Vorsorgeprinzip geboten wäre. Will man sich nicht mit der sarkastischen Erklärung einer prinzipiell „dummen Menschheit“ zufriedengeben, so lohnt sich ein genauerer Blick in die wechselvolle Geschichte der Klimaforschung.

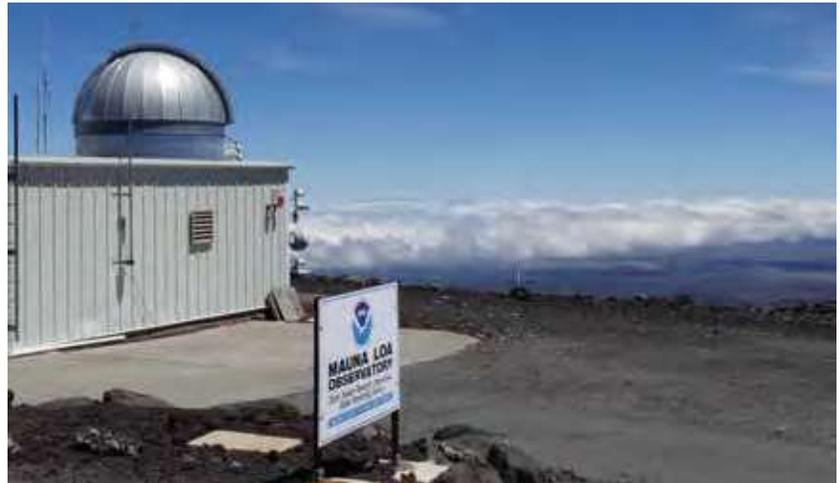
Im 19. Jahrhundert enträtselten Protagonisten der frühen Klimawissenschaft nicht nur das Prinzip der lebensfreundlichen Wärme auf unserem Planeten, sie formulierten auch zutreffende Thesen zu den damals schon bekannten Klimawechseln in der Erdgeschichte. Der Entdecker des Treibhauseffekts, der französische Mathematiker und Physiker Jean-Baptiste Fourier, veröffentlichte seine Erkenntnisse zwei Jahre nach Gründung der GDNÄ. 1856 zeigten die Amerikanerin Eunice Foote und 1859 der Ire John Tyndall unabhängig voneinander, dass das Spurengas Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) die Ursache des Effekts ist. Und schließlich stellte der schwedische Nobelpreisträger Svante Arrhenius 1896 die erste Strahlungsbilanz auf und berechnete, um wie viel Grad Celsius sich die Erdoberfläche bei Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehalts erwärmen würde. Das Ergebnis seiner beeindruckend präzisen handschriftlichen Kalkulation: zwischen fünf und sechs °C, je nach Breitengrad.

Wie sich die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur bei einer angenommenen Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehalts erhöht, wird heute als Klimasensitivität bezeichnet. Sie ist die wichtigste Charakterisierung dafür, wie sensibel das Klima auf Treibhausgase wie CO<sub>2</sub> reagiert. Generationen von Klimaforscherinnen

und -forschern haben sich bemüht, diese Maßzahl genauer zu fassen: Sie wird heute auf 2,5 °C bis 4 °C geschätzt, wobei 3 °C als bester Wert gilt<sup>166</sup>. Die Schwierigkeit, die Spannweite der Abschätzung zu verkleinern, ist zum einen ein Hinweis auf die Komplexität des Klimasystems, zum anderen steht sie für ein Phänomen, das in der Wissenschaft nicht unbekannt ist: Mit der Menge des Wissens nehmen häufig auch die Ungewissheiten zu.

Zur Zeit von Svante Arrhenius, in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, war man von solchen Überlegungen noch weit entfernt. Die Welt erschien unendlich chancenreich und der Mensch machte sich voller Zuversicht daran, „Gottes perfektes Uhrwerk“ (Gottfried Wilhelm Leibniz) zu enträtseln. Dass die Menschheit geophysikalische Phänomene wie das Klima verändern könnte, war damals unvorstellbar – oder allenfalls ein Gedankenexperiment, das sich Arrhenius eher positiv vorstellte: „Durch Einwirkung des erhöhten Kohlensäuregehaltes der Luft hoffen wir, uns allmählich Zeiten mit gleichmäßigeren und besseren klimatischen Verhältnissen zu nähern...“<sup>167</sup>

Im 20. Jahrhundert ging es mit dem technischen Fortschritt rasant voran, was es Forscherinnen und Forschern ermöglichte, die Bestätigung ihrer Erkenntnisse in der realen Welt zu suchen. Ende der 1950er-Jahre schreckten zwei Ergebnisse die Fachwelt auf: Der Amerikaner Roger Revelle wies 1957 zusammen mit dem Österreicher Hans Suess nach, dass die Ozeane das vom Menschen produzierte CO<sub>2</sub> nicht, wie gedacht, komplett aufnehmen. Reichert es sich also doch in der Atmosphäre an? Manipuliert der Mensch die Temperatur der Erde tatsächlich? Revelle ahnte den Paradigmenwechsel und warnte: „Die Menschen führen momentan



Das Mauna-Loa-Observatorium liegt in einer Höhe von knapp 3400 Metern auf Hawaii. Seit 1958 wird hier der Kohlendioxid-Gehalt der Luft gemessen und in der berühmten Keeling-Kurve dokumentiert (s. Abb. 2, S. 106).

© Susan Cobb/NOAA Global Monitoring Laboratory/ap

393. *On the Heat in the Sun's Rays.*

ART. XXXI.—*Circumstances affecting the Heat of the Sun's Rays ;*  
by EUNICE FOOTE.

(Read before the American Association, August 23d, 1856.)

My investigations have had for their object to determine the different circumstances that affect the thermal action of the rays of light that proceed from the sun.

Several results have been obtained.

First. The action increases with the density of the air, and is diminished as it becomes more rarified.

The experiments were made with an air-pump and two cylindrical receivers of the same size, about four inches in diameter and thirty in length. In each were placed two thermometers, and the air was exhausted from one and condensed in the other. After both had acquired the same temperature they were placed in the sun, side by side, and while the action of the sun's rays rose to 110° in the condensed tube, it attained only 88° in the other. I had no means at hand of measuring the degree of condensation or rarefaction.

The observations taken once in two or three minutes, were as follows:

Exhausted Tube.		Condensed Tube.	
In shade.	In sun.	In shade.	In sun.
78	80	78	88
74	82	78	95
80	82	80	100
82	88	82	108
84	88	82	110

This circumstance must affect the power of the sun's rays in different places, and contribute to produce their feeble action on the summits of lofty mountains.

Secondly. The action of the sun's rays was found to be greater in moist than in dry air.

In one of the receivers the air was saturated with moisture—in the other it was dried by the use of chlorid of calcium.

Both were placed in the sun as before and the result was as follows:

Dry Air.		Moist Air.	
In shade.	In sun.	In shade.	In sun.
78	78	78	78
78	88	78	80
82	100	82	108
82	104	82	110
82	108	82	114
84	108	82	120

Erste Seite der Pionierarbeit der US-Amateurforscherin Eunice Foote, die 1856 nachwies, dass CO<sub>2</sub> Strahlung absorbiert. Ihre Leistung geriet jedoch in Vergessenheit und wurde erst 2010 wiederentdeckt.

© American Journal of Science and Arts

## KLIMAWANDEL

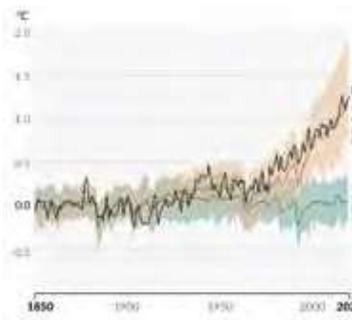


Abb. 1  
Die Änderung der globalen Oberflächentemperatur (Jahresmittel) von 1850 bis heute: Der Vergleich zwischen beobachteter (schwarze Kurve) und simulierter natürlicher Veränderung (grün) verdeutlicht den Einfluss des Menschen auf das Klima.

© IPCC AR6 WGI, Abb. SPM.1b

Abb. 2  
Die Keeling-Kurve: Bis auf jahreszeitliche Schwankungen geht die CO<sub>2</sub>-Konzentration seit 1958 stetig nach oben. Die Emissionsreduktion durch die Covid-Pandemie blieb in der CO<sub>2</sub>-Konzentration unsichtbar. Um klar sichtbar zu werden, müsste eine solche Reduktion mindestens fünf Jahre<sup>176</sup> lang anhalten.

© Scripps Institution of Oceanography



ein großangelegtes geophysikalisches Experiment aus, das so weder in der Vergangenheit hätte passieren können, noch in der Zukunft wiederholt werden kann.“<sup>168</sup> Ein Jahr später, im Jahr 1958, begann der US-Klimaforscher Charles Keeling erstmals mit systematischen Messungen von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, und zwar an einem von menschlichen Störungen weit entfernten Ort: dem Berg Mauna Loa auf Hawaii. Schon nach wenigen Jahren war unzweifelhaft klar, dass die Treibhausgaskonzentration, von jahreszeitlichen Schwankungen abgesehen, nur eine Richtung kennt: nach oben (Abb. 2).<sup>169</sup> Von da an verdichteten sich die Hinweise, dass der Mensch zum Geo-Faktor geworden war. Diese Vorstellung erschien so atemberaubend und so abstrakt, dass sie ganz überwiegend nicht ernst genommen wurde. Mehr noch: Sie hätte die zentrale Voraussetzung des modernen Wohlstands, die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, infrage stellen müssen.

Für die Klimaforschung war es der Start in eine neue Ära. Laborexperimente und Messungen in der realen Welt reichten nicht mehr aus – jetzt brauchte man Modelle, die einen „Planet B“, eine Art zweite Erde, simulieren, um sie dann für Experimente zu nutzen.<sup>170</sup> Und: Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Klimawandel zogen die öffentliche Aufmerksamkeit auf sich und waren fortan auch politisch.

Zwei Wissenschaftler brachten die Beweisführung entscheidend voran: der Japaner und US-Forscher Syukuro Manabe und Klaus Hasselmann, Gründungsdirektor des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg. Manabe entwickelt 1967 ein Klimamodell, das über den schon von Arrhenius berechneten Strahlungstransport hinaus auch den vertikalen Wärmetransport durch Konvektion berücksichtigen konnte. Auf diese Weise lieferte er die grundlegende Erklärung für die globale Erwärmung.

Hasselmann kam 1979 auf eine wegweisende Idee: Man müsste, so sein Vorschlag, eine Welt mit dem menschlichen Beitrag simulieren und eine zweite Welt, in die nur natürliche Ursachen wie Vulkanausbrüche oder Sonnenaktivität eingehen – und schließlich beide Simulationen mit den tatsächlichen Beobachtungen abgleichen. Erkennt man in den Beobachtungsdaten das

Änderungsmuster der ersten Simulation, dann wäre der menschliche Fingerabdruck identifiziert. Erst in den 1990-er Jahren konnte Hasselmann seine Idee umsetzen und den menschlichen Einfluss nachweisen. Im Jahr 2021 wurden beide Forscher mit dem Physiknobelpreis geehrt. Ohne Manabes Erklärung und ohne Hasselmanns Beweisführung wäre das Pariser Klimaabkommen von 2015 undenkbar gewesen.

Allerdings war der Weg nach Paris steinig und voller Rückschläge. Nach Manabes und Hasselmanns bahnbrechenden Publikationen sollten noch Jahrzehnte verstreichen. Was rückblickend als pure Zeitverschwendung erscheint, hat zum einen mit der gigantischen Aufgabe zu tun: der Transformation in eine klimaneutrale Welt. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) bezeichnet sie als eine „historisch einmalige Herausforderung“, die einen „umfassenden Umbau“ erfordere.<sup>171</sup> Zum anderen ist der Klimawandel mit unseren menschlichen Sinnen nicht wahrnehmbar. Begreifen können wir ihn nur, wenn wir den Nachweismethoden vertrauen. Das macht die Wissenschaft zu einem zentralen Akteur für Politik, Klimabewegung – und für Klima(wandel)leugner. Während letztere das Problem aus der Welt zu schaffen versuchen, indem sie die Wissenschaft als unglaublich attackieren, fordern Politik und Gesellschaft wissenschaftliche Beratung geradezu ein.

Das wohl prominenteste Beratungsgremium ist der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Er wurde 1988 von den Vereinten Nationen und der Weltorganisation für Meteorologie gegründet, um regelmäßig das vorhandene Wissen über den Klimawandel zu bewerten. In der Folge entstand ein neuer Kosmos von Beiräten, Enquete-Kommissionen und Dialogformaten zwischen Wissenschaft und Politik. Gleichzeitig kam es zu intensiven Debatten über die „richtige“ Wissenschaftskommunikation. Immer deutlicher zeigte sich, dass Wissen zwar notwendig, aber nicht hinreichend ist, um Veränderungen in Gang zu setzen. Zumal wenn sie praktisch alle Lebensbereiche betreffen, wie im IPCC-Sonderbericht „1,5 Grad globale Erwärmung“<sup>172</sup> dargelegt. Gangbare Wege lassen sich nur gemeinsam finden. In diesem Sinne arbeiten im Hamburger Exzellenzcluster „Klima, Klimawandel und Gesellschaft“ die Universität Hamburg und das Max-Planck-Institut für Meteorologie mit Partnern aus Wissenschaft und Praxis zusammen. Die anderswo bislang nicht verfolgte Kernfrage lautet: Welche Klimazukünfte sind möglich – und welche sind plausibel? Die 2021 unter dem Titel „Hamburg Climate Futures Outlook“ veröffentlichten ersten Ergebnisse sind allerdings ernüchternd: Nicht plausibel ist demnach, dass die Menschheit bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität erreicht und sich somit die Erderwärmung auf 1,5 °C begrenzen lässt.<sup>173</sup>

Für die Wissenschaft steht heute nicht mehr der Nachweis des anthropogenen Klimawandels im Fokus. Dieser Nachweis ist geführt, wie der jüngste IPCC-Sachstandsbericht bestätigte<sup>174</sup>. Was aber sind die Konsequenzen des fortschreitenden Klimawandels? Und wie ändert sich das Wetter mit dem Klima? Zur Beantwortung dieser Fragen benötigen wir eine neue Generation von Klimamodellen, mit denen die leistungsfähigsten Supercomputer effizient genutzt werden können. Am Max-Planck-Institut für Meteorologie wurde gerade ein solches Modell zur Betriebsreife gebracht.<sup>175</sup> Mit diesem weltweit vielleicht modernsten Klimamodell können wir die dringenden Fragen nach dem künftigen Klimawandel nun angehen.



© DKK, Stephan Röhl



© MPI-M, David Ausserhofer

**Marie-Luise Beck** ist seit 2012 Geschäftsführerin des Deutschen Klima-Konsortiums (DKK) in Berlin. Der Verband vertritt die Interessen der wichtigsten Akteure der deutschen Klimaforschung in Politik und Gesellschaft.

**Jochem Marotzke** ist Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, Professor an der dortigen Universität und stellvertretender Sprecher des Klima-Exzellenzclusters. Zu den Forschungsschwerpunkten des Physikers zählen Klimavorhersagen und die Rolle großräumiger Meeresströmungen im Klimageschehen.