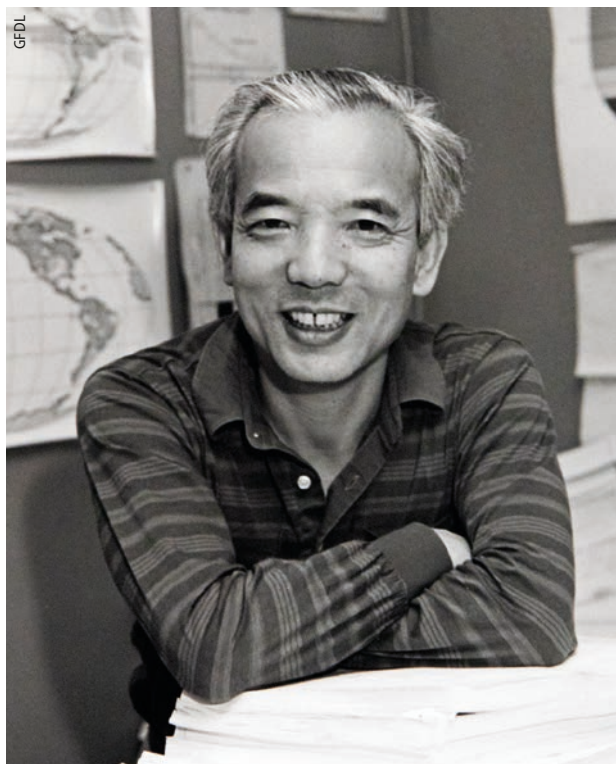


# Physik und Klima

Zum Physik-Nobelpreis 2021 an Syukuro Manabe und Klaus Hasselmann

Jochem Marotzke



Syukuro (Suki) Manabe wurde 1931 in Shingu, Japan, geboren und promovierte 1957 an der Universität Tokio. Anschließend ging er in die USA und arbeitete bis 1997 am Geophysical Fluid Dynamics Laboratory der amerikanischen Wetterbehörde. Nach einem Forschungsaufenthalt in Japan kehrte er 2002 in die USA zurück und wirkt seither als Senior Meteorologist an der Princeton University. Die Aufnahme zeigt ihn 1997 in seinem Büro.

Eine Hälfte des Nobelpreises für Physik 2021 erhalten Syukuro (Suki) Manabe und Klaus Hasselmann „für die physikalische Modellierung des Erdklimas, für die Quantifizierung seiner Schwankungen und die verlässliche Vorhersage der Erderwärmung“. Es ist der erste Nobelpreis für Umweltphysik und der zweite in den Umweltwissenschaften nach dem Chemie-Nobelpreis 1995 für die Erklärung des Ozonlochs an Paul Crutzen, Mario Molina und Sherwood Rowland.

**S**uki Manabe und Klaus Hasselmann sind so emine[n]te Figuren in der Klimaphysik, dass ich sie beide persönlich kenne. Klaus Hasselmann war ein steter Begleiter meines eigenen beruflichen Werdegangs, aber die Ideengeschichte dieses Nobelpreises begann mit Suki Manabe. Daher möchte ich diesen Beitrag auch mit ihm beginnen.

## Der Wirbelwind

Suki Manabe feierte am 25. September seinen 90. Geburtstag. Er stammt aus Japan, hat aber praktisch sein gesamtes Berufsleben in den USA verbracht – überwiegend in Princeton, New Jersey – abgesehen von einer kurzen Rückkehr nach Japan nach seiner offiziellen Pensionierung. Die meiste und produktivste Zeit in Princeton verbrachte er nicht an der berühmten Universität, sondern am – außerhalb der Fachwelt weitgehend unbekanntem – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL). Diese Einrichtung der Wetterbehörde der USA genießt innerhalb des Fachs einen legendären Ruf. Der ebenso legendäre erste Direktor Joseph Smagorinsky versammelte Ende der 1950er-Jahre die weltweit herausragendsten Talente am GFDL, um numerische Modelle für Atmosphäre und Ozean zu entwickeln. Als einer von ihnen genoss Suki Manabe praktisch völlige Freiheit, um seine wissenschaftlichen Ziele zu verfolgen. 1969 gelang es der Gruppe um ihn und um den Ozeanmodellierer Kirk Bryan, das erste gekoppelte Zirkulationsmodell für Atmosphäre und Ozean zu erstellen [1].

In Manabes nobelpreisgekrönter Arbeit geht es jedoch um eine viel fundamentalere Frage: Er benannte als Erster die unverzichtbaren Prozesse, um die Folgen einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre theoretisch vorherzusagen. Unter den damals vergleichsweise bescheidenen Umständen fasste er die Prozesse in numerischen Modellen zusammen und leitete aus ihnen wichtige Ergebnisse her.

Das „Standardproblem“ in der Klimaforschung lautet: Um wie viel Grad erhöht sich die Temperatur der Erdoberfläche im globalen Mittel, wenn sich die Kohlendioxid-Konzentration verdoppelt? Manabe erkannte, dass dies kein reines Problem des vertikalen Strahlungstransports war. Zwar geht es im Kern um den Transport kurzweiliger Sonnenstrahlung nach unten und den Transport langweiliger, terrestrischer Strahlung nach oben. Und es dauerte bis Anfang der 1960er-Jahre, ehe Manabe diesen Strahlungsteil einigermaßen zuverlässig berechnen konnte – zusammen mit dem Deutschen Fritz Möller [2]. Es gilt aber weit mehr, als nur den Strahlungstransport zu berücksichtigen.

Manabe erkannte, wie essenziell die Konvektion, also der rasche vertikale Austausch durch Strömungen, für das Problem war, vermutlich aufbauend auf seiner Dissertation in Japan. Darin hatte er die Wechselwirkung von Kaltluftausbrüchen vom Kontinent im Winter mit dem relativ warmen Japanischen Meer untersucht. Über diese Erkenntnis hinaus vermochte er, eine angemessen vereinfachte Darstellung in die primitiven Modelle dieser Zeit einzubauen

[3]. Die dritte wichtige Zutat folgte aus der empirisch gut belegten Erkenntnis, dass die Atmosphäre zu einigermaßen konstanter relativer Feuchte tendiert: Der Bruchteil an Wasserdampf bezogen auf die bei einer bestimmten Temperatur theoretisch mögliche Menge ist annähernd gleich. Daraus resultiert eine der wichtigsten verstärkenden Rückkopplungen im Klimasystem: Wenn bei höherer Temperatur mehr Wasserdampf in der Atmosphäre vorliegt, verstärkt dieses Treibhausgas die Erwärmung (**Abb. 1**) [4]. Das Konzept, Strahlung, Konvektion und konstante relative Feuchte zu betrachten, ist bis heute die Basis jeder physikalischen Charakterisierung der atmosphärischen Reaktion auf eine erhöhte Kohlendioxid-Konzentration.

Suki Manabe infiziert alle mit seinem unbändigen Enthusiasmus für die Forschung und den Drang, das Klima zu verstehen. Die Charakterisierung als „Wirbelwind“ wird der Elementarkraft nicht einmal annähernd gerecht, die Suki Manabe im wissenschaftlichen Kosmos darstellt.

## Der Magier

Klaus Hasselmann konnte seinen 90. Geburtstag genau einen Monat nach Suki Manabe feiern, am 25. Oktober. Hasselmanns Leben und Wirken gestalteten sich so international, wie ich es nur von wenigen anderen kenne. Noch vor seinem dritten Geburtstag floh sein Vater, der sozialdemokratische Publizist Erwin Hasselmann, mit seiner Familie vor dem Naziregime aus Hamburg nach England. Erst 1949 kehrte die gesamte Familie nach Deutschland zurück, und Klaus Hasselmann begann im Jahr darauf ein Physikstudium an der Universität Hamburg. Seine frühe Forschung drehte sich um Turbulenz und hatte wenig Bezug zum Klima. Er promovierte 1957 am damaligen Max-Planck-Institut für Strömungsforschung in Göttingen.

Von 1961 bis 1964 war er zunächst Assistant Professor, später Associate Professor an der Scripps Institution of Oceanography nahe San Diego in Kalifornien. Wie er mir einmal erzählte, fungierte Walter Munk als sein Mentor und eigentlich zweiter Betreuer. Als einer von nur zwei Ozeanographen erhielt Munk 2010 den Crafoord-Preis der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften. Dieser wird seit 1982 vergeben, um die Grundlagenforschung in den Disziplinen zu ehren und zu fördern, die der Nobelpreis nicht abdeckt. Munk führte Klaus Hasselmann in den wissenschaftlichen Mainstream der Ozeanforschung ein – und brachte ihn somit indirekt zur Klimaforschung.

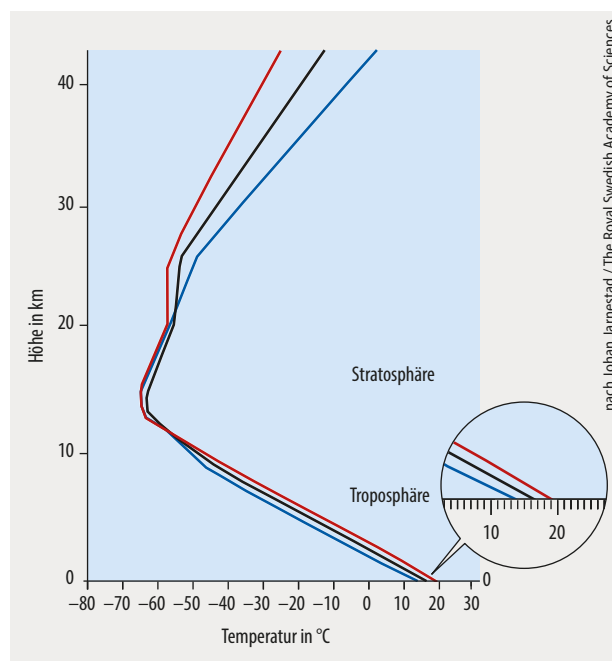
In diese Zeit fällt seine erste wissenschaftliche Großtat, die theoretische Erklärung des Seegangs. Der Seegang, also des Oberflächenwellenfeld im offenen Ozean, beruht auf der nichtlinearen Wechselwirkung innerhalb eines kontinuierlichen Wellenspektrums [5]. Entscheidend war es, das Wellenfeld stochastisch zu beschreiben statt deterministisch – ein neuer Weg, den er auch in späteren bedeutenden Arbeiten beschritt. Hasselmann trieb die Weiterentwicklung seiner Seegangstheorie voran zum heute meistgenutzten operationellen Vorhersagemodell für diesen Prozess [6], das auch in viele Modelle zur Wettervorhersage eingeht.

1964 kehrte Klaus Hasselmann als Professor an die Universität Hamburg zurück, aber es hielt ihn nicht lange dort.

Ab 1970 arbeitete er in Massachusetts an einem anderen berühmten US-amerikanischen meereskundlichen Institut: der Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI). Als erster Inhaber der Doherty-Proffessur hatte er dort die einzige festfinanzierte Stelle inne. Dennoch erfolgte schon 1972 die endgültige Rückkehr nach Deutschland.

Hier machte die Klimaforschung große Fortschritte. Bert Bolin, der spätere Gründer des Weltklimarats IPCC, und der Nestor der deutschen Klimaforschung Hermann Flohn überzeugten Reimar Lüst, den Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft, ein eigenes Institut zur Klimaforschung zu gründen. Für den Posten des Gründungsdirektors schlugen sie Klaus Hasselmann vor. Nach eigenen Angaben „vergeigte“ dieser seinen Vorstellungsvortrag jedoch komplett: Die entscheidende Kommission konnte ihm nicht folgen. Dennoch berief sie ihn zum Direktor, und das Institut nahm 1975 seine Arbeit auf. Der nie ganz zutreffende Institutsname lautete „Max-Planck-Institut für Meteorologie“ (MPI-M). Denn bei der Gründung hätten die Physiker in der Max-Planck-Gesellschaft ein „Max-Planck-Institut für Klimaforschung“ wohl nicht akzeptiert. Sie sahen in der beschreibenden Klimatologie einen Zweig der Geographie; aber der Meteorologie als Physik der Atmosphäre stimmten sie zu. Spätere Direktoren änderten den Namen nicht: Da er nie gestimmt hatte, war er mit der Zeit auch nicht unpassender geworden.

In die Anfangszeit des MPI-M fielen auch die Ursprünge der Arbeit, für die Klaus Hasselmann nun den Nobelpreis erhält. Zunächst entwickelte er die stochastischen Klimamodelle und zeigte, dass sich zufällige niederfrequente Klimaschwankungen als Resultat des hochfrequenten zufälligen Wetterauschens darstellen lassen. Mathematisch ist die Beschreibung analog zur Brownschen Bewegung, wenn



**Abb. 1** Der Gehalt an Kohlendioxid in der Atmosphäre (rot: 600 ppm, schwarz: 300 ppm, blau: 150 ppm) beeinflusst nicht nur die Temperatur in der Höhe, sondern auch am Boden. Ein Verdoppeln der Kohlendioxid-Konzentration (Inset) führt zu einem Anstieg von 2,36 °C, beim Halbieren sinkt die Temperatur um 2,28 °C [4].

das Klima als der große Körper fungiert und das Wetter als die einzelnen Atome [7]. Das ist die meistzitierte Arbeit Hasselmanns – obwohl Charles Leith zeitgleich und unabhängig mit seinem „fluctuation-dissipation theorem“ etwas Äquivalentes formulierte [8].

Singulär bleibt hingegen Hasselmanns Arbeit zur Entdeckung des menschlichen Fingerabdrucks im Klimageschehen [9]. Suki Manabe bestimmte die wesentlichen Zutaten zu einer Theorie des Treibhauseffekts. Doch wie zeigt sich das sehr kleine Signal des Klimawandels im viel größeren Rauschen des Wetters? Hasselmann formulierte das grundsätzliche Problem erstmals quantitativ und zeigte, wie schwer sich das Klimasignal statistisch signifikant aus den Daten einzelner Wetterstationen herauslesen lässt – selbst bei gemittelten Einzeldaten. Geradezu aus dem Nichts fand er eine Lösung für das Problem. Zunächst erzeugt ein Klimamodell ein Muster der zu erwartenden Änderungen. Dann gilt es zu prüfen, ob dieses Muster in den Beobachtungen besser erkennbar ist, als es ein rein zufälliges Rauschen erklärt.<sup>1)</sup> Falls ja, liegt ein deterministisches Änderungssignal vor. Für dieses univariate statistische Problem ist statistische Signifikanz viel einfacher zu erreichen als für die multivariate Darstellung vieler Stationsdaten.

Die Arbeit fand zunächst wenig Beachtung. Als Beitrag eines eher obskuren Buchs, einem Konferenzband mit dem Titel „Meteorologie über den tropischen Ozeanen“, wurde sie in den ersten zehn Jahren nur dreißigmal zitiert. Dennoch legte sie den Grundstein für eine atemberaubende Entwicklung, wie sowohl Ben Santer [10] als auch Naomi Oreskes [11] in historischen Betrachtungen betonen. Die ursprüngliche Arbeit präsentierte nur die Methode ohne konkrete Anwendung. Diese gelang erst mit dem Fortschreiten des Klimawandels, einer verbesserten Datenlage und weiterentwickelten Klimamodellen. Für letzteres sorgte auch das MPI-M, unter anderem durch die Berufung des Atmosphärenmodellierers Lennart Bengtsson 1991. Außerdem war ein weiterer „Umweg“ notwendig: die Gründung



Julia Knopf / MPG

Klaus Hasselmann (geb. 1931 in Hamburg) promovierte 1957 an der Universität Göttingen und habilitierte sich 1963 an der Universität Hamburg. Der Klimaforscher, Meteorologe und Ozeanograph war in den USA und Deutschland tätig, unter anderem in Hamburg als Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie (1975 bis 1999) und als wissenschaftlicher Direktor am Deutschen Klimarechenzentrum (1988 bis 1999).

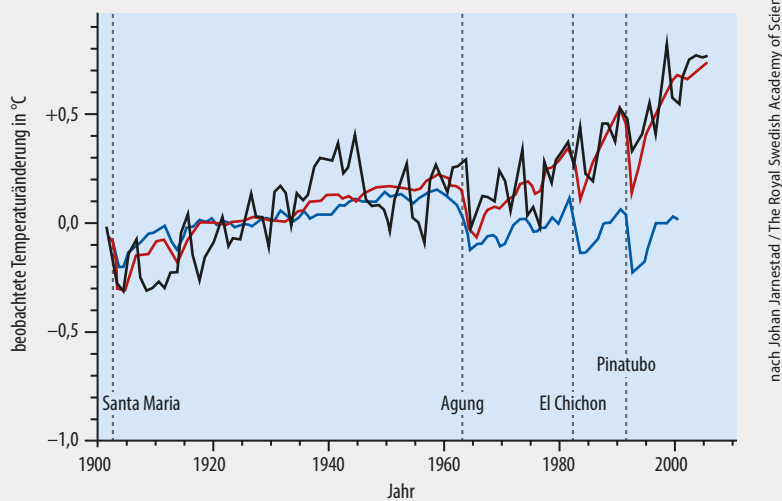
des Deutschen Klimarechenzentrums DKRZ. Von 1988 bis zu seiner Emeritierung 1999 agierte Klaus Hasselmann als wissenschaftlicher Direktor, sodass dem MPI-M ausreichend Rechenressourcen zur Verfügung standen.

Noch in den 1990er-Jahren gelang es, den menschlichen Fingerabdruck im beobachteten Klimawandel nachzuweisen. Zunächst zeigten 1996 die Teams um Gabriele Hegerl [12], eine Doktorandin am MPI-M, und um Ben Santer [13], vormaliger Postdoc Klaus Hasselmanns, dass das Rauschen allein die Beobachtungen nicht erklärt. Dieser Entdeckung eines deterministischen Signals folgte 1997 – erneut durch Gabriele Hegerl und das MPI-M-Team – die Zuschreibung, also der Nachweis, dass Treibhausgase das detektierte Signal erzeugten (Abb. 2) [14].

Das Prinzip von Entdeckung und Zuschreibung, auf Englisch „Detection and Attribution“ (D&A), hat sich zu einem eigenständigen Bereich in der Klimaforschung entwickelt, den alle IPCC-Berichte mit einem eigenen Kapitel würdigen: In immer mehr Aspekten des Klimageschehens lässt sich der menschliche Einfluss nachweisen. D&A belegte auch die Richtigkeit der Theorie der Globalen Erwärmung, als deren wichtigster Protagonist Suki Manabe gilt. Doch ohne diesen Nachweis, also ohne Klaus Hasselmanns Arbeit, wäre das Pariser Klimaabkommen undenkbar gewesen. Wie die Weltgemeinschaft damit weiter umgehen wird, müssen die kommenden Jahre zeigen.

## Etwas Persönliches

Klaus Hasselmann hat mein Leben entscheidend geprägt, obwohl wir nie zusammengearbeitet haben. Als orientierungsloser Physik-Student liebte ich die Theoretische Physik, ohne zu wissen, an welchen Phänomenen ich mich abarbeiten sollte. Wobei mir diese heutige Formulierung



nach Johan Jamestad / The Royal Swedish Academy of Sciences

**Abb. 2** Gehen in Simulationen nur die natürlichen Ursachen wie Vulkanausbrüche (gestrichelt) und Sonnenvariabilität ein, stimmen die Temperaturänderungen in der Atmosphäre (blau) nicht mit den Daten überein (schwarz). Dazu ist es notwendig, zusätzlich den menschlichen Beitrag zu berücksichtigen (rot).

damals nicht in den Sinn gekommen wäre. 1981 nahm ich an einer von Klaus Hasselmann geleiteten Ferienakademie der Studienstiftung des Deutschen Volkes teil. Sein Ziel und das seiner Kollegen Dirk Olbers und Jürgen Willebrand – meines späteren Doktorvaters – war es, Studierende von Physik und Mathematik für die Klimaforschung zu begeistern. Ich zählte in diesem Jahr zu ihrer Beute.

Obwohl ich nicht in Hamburg promovierte, traf ich Klaus Hasselmann immer wieder, zum Beispiel bei meiner ersten internationalen Sommerschule als Doktorand. Er wirkte etwas furchteinflößend mit seiner atemberaubenden Schnelligkeit, die Dinge zu durchdringen. Meine englischen Kollegen beruhigte es zu hören, dass er im Deutschen genauso schwer zu verstehen war wie im Englischen: Sein Englisch ist perfekt und akzentfrei, aber extrem schnell und wegen einer leicht festgewachsenen Zunge etwas undeutlich. Was alle an ihm faszinierte – und daran hat sich bis heute nichts geändert – ist sein absolutes Beharren auf dem Primat der Wissenschaft gepaart mit sehr großer persönlicher Freundlichkeit und Bescheidenheit. So fügte er bei der Sommerschule spontan eine weitere Vorlesung ein, damit alle die Begründung seiner Vorgehensweise wirklich verstanden hatten. Er mochte etwas ungeduldig mit uns langsamen Denkhern sein, aber Status floß nie in die Diskussion ein. Ich bin ihm überaus dankbar, dass er als Gründungsdirektor ein großartiges Institut aufbaute, das ich heute (mit-)leiten darf.

\*

Ich danke meinem Kollegen Bjorn Stevens für seine vertiefenden Erläuterungen zu Suki Manabes Leistungen.

## Literatur

- [1] S. Manabe und K. Bryan, *J. Atmos. Sci.* **26**, 786 (1969)
- [2] S. Manabe und F. Möller, *Mon. Wea. Rev.* **89**, 503 (1961)
- [3] S. Manabe und R. F. Strickler, *J. Atmos. Sci.* **21**, 361 (1964)

1) Mathematisch formuliert werden sowohl die Beobachtungen als auch das Rauschen auf das Muster projiziert, das die Rolle eines Basisvektors spielt.

- [4] S. Manabe und R. T. Wetherald, *J. Atmos. Sci.* **50**, 241 (1967)
- [5] K. Hasselmann, *J. Fluid Mech.* **12**, 481 (1962)
- [6] S. Hasselmann et al., *J. Phys. Oceanogr.* **18**, 1775 (1988)
- [7] K. Hasselmann, *Tellus* **28**, 473 (1976)
- [8] C. E. Leith, *J. Atmos. Sci.* **32**, 2022 (1975)
- [9] K. Hasselmann, On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies, in: *Meteorology over the Tropical Oceans*, D. B. Shaw (Hrsg.), Royal Meteorological Society, London, 1979, S. 251
- [10] B. D. Santer et al., *Nat. Clim. Change* **9**, 180 (2019)
- [11] N. Oreskes und E. M. Conway, *Merchants of Doubt*, Bloomsbury, 2010, S. 355
- [12] G. C. Hegerl et al., *J. Climate* **9**, 2281 (1996)
- [13] B. D. Santer et al., *Nature* **382**, 39 (1996)
- [14] G. C. Hegerl et al., *Clim. Dyn.* **13**, 613 (1997)

## Der Autor



Julia Knop / MPG

**Jochem Marotzke** studierte Physik in Bonn, Kopenhagen und Kiel und promovierte 1990 in Ozeanographie an der U Kiel. Danach arbeitete er neun Jahre am Massachusetts Institute of Technology, zuletzt als Associate Professor. 1999 wurde er Professor am Southampton Oceanography Centre (UK). Vier Jahre darauf ging er als Direktor an das MPI-M und ist seit 2006 auch Professor an der U Hamburg.

**Prof. Dr. Jochem Marotzke**, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstr. 53, 20146 Hamburg

## MBE KOMPONENTEN | DR. EBERL

- Compact research MBE system
- Applications: II-VI, III-V, IV-IV MBE, magnetic materials, topological insulators, 2D materials, etc.
- Up to 9 source ports for, e.g., effusion cells, valved cracker sources, e-beam evaporators
- Sample size: flag style 10x10 mm<sup>2</sup>, 1" or 2" wafer
- Base pressure < 5x10<sup>-11</sup> mbar
- Stainless steel LN2 cooling shroud
- In-situ monitoring

