

Der 6. Sachstandsbericht des Weltklimarats Im Maschinenraum des neuen IPCC-Berichts

JOCHEM MAROTZKE

Der jüngst veröffentlichte 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC konnte einige zentrale Aussagen zum vergangenen und künftigen menschengemachten Klimawandel in bislang nie dagewesener Deutlichkeit tätigen. Dies wurde durch die weltweite Zusammenarbeit in der Klimaforschung möglich und baut ganz wesentlich auf den Erkenntnissen auf, für die Klaus Hasselmann und Syukuro Manabe im Jahr 2021 mit dem Physiknobelpreis geehrt wurden.

Der im August 2021 veröffentlichte Sachstandsbericht 6 (AR6) des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen IPCC [1, 2] hat wie seine Vorgänger für Schlagzeilen gesorgt. „Es ist eindeutig, dass der Einfluss des Menschen die Atmosphäre, die Ozeane und die Landflächen erwärmt hat“ und „Eine globale Erwärmung von 1,5 °C und 2 °C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden, außer es erfolgen in den kommenden Jahrzehnten drastische Verringerungen der CO₂- und anderer Treibhausgasemissionen“ sind zentrale Ergebnisse und wurden in den Medien häufig zitiert oder paraphrasiert. Obwohl sie bekannte Fragen ansprechen – „Ist der Mensch verantwortlich?“ oder „Was sind die Folgen künftiger Emissionen?“ –, unterscheiden sie sich von früheren Schlagzeilen durch die Gewissheit, die sie nun zum Ausdruck bringen können.

Etwas abseits des Rampenlichts gibt es jedoch noch einen weiteren wissenschaftlichen Fortschritt im AR6, einen echten Durchbruch, der eine wichtige Rolle dabei spielte, die zweite der oben zitierten Schlagzeilen zu ermöglichen [2, 3]. Ich spreche von der nichts weniger als atemberaubenden Aussage „Die beste Schätzung [der Gleichgewichts-Klimasensitivität] des AR6 liegt bei 3 °C, mit einer *wahrscheinlichen* Spanne von 2,5 °C bis 4 °C (*bobes Vertrauen*), verglichen mit 1,5 °C bis 4,5 °C im AR5“ [2, 4]. Ich werde hier erläutern, warum diese Aussage so bemerkenswert ist, worauf sie beruht und warum sie so bedeutsam für die Schlagzeile zu den Pariser Klimazielen ist. Entlang des Wegs werden wir beispielhaft sehen, wie internationale Forschung funktioniert, und wir werden auch erkennen,

wie beide Schlagzeilen fundamental von der Forschung abhängen, für die Klaus Hasselmann und Syukuro Manabe mit dem Physik-Nobelpreis 2021 ausgezeichnet wurden.

Geschichte der Klimasensitivität – 40 Jahre scheinbarer Stagnation

Seit Arrhenius' bahnbrechender Arbeit aus dem Jahr 1896 [5] hat sich die Gleichgewichts-Klimasensitivität (Equilibrium Climate Sensitivity, ECS) zur wichtigsten physikalischen Kenngröße für den Klimawandel etabliert. Die ECS beschreibt ein Gedankenexperiment: Wir stellen uns vor, die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre verdoppelt sich, dann stellt die ECS als Folge die langfristige global gemittelte Erwärmung der Erdoberfläche dar. Viele Elemente des Klimawandels verlaufen proportional zur global gemittelten Erwärmung [3], daher stammt die überragende Bedeutung der ECS als Charakterisierung dessen, wie empfindlich das Klima auf Störungen wie etwa menschengemachte CO₂-Emissionen reagiert.

Und hier wird es unangenehm: In der ersten formalen Bewertung des Wissens über die Klimafolgen von CO₂-Emissionen im Jahr 1979, bekannt geworden als der Charney-Bericht [6], wurde die ECS angegeben als „höchstwahrscheinlich nahe 3 °C, mit einem mutmaßlichen Fehler von ±1,5 °C“. In den nachfolgenden vierzig Jahren hat sich diese Bandbreite von 1,5 °C bis 4,5 °C störrisch jeder Reduktion widersetzt. Im AR4 des IPCC gab es einen kurzen Wackler, als die untere Grenze auf 2,0 °C angehoben wurde, aber im AR5 wurde sie wieder auf 1,5 °C gesenkt. Die Definition dieses Unsicherheitsbereichs ist immer ausgefeilter geworden (das kursiv gedruckte *wahrscheinlich* im obigen Satz aus dem AR6 bedeutet: mit einer Wahrscheinlichkeit von 66% oder mehr), aber der Bereich selbst hat sich nicht geändert.

Was ist also passiert, dass der AR6 einen vierzig Jahre alten Unsicherheitsbereich um die Hälfte reduzieren konnte? (Man beachte, dass die beste Schätzung mit dem Mittelwert der AR5-Spanne übereinstimmt und dass die untere Grenze stärker gestiegen als die obere Grenze gesunken ist.) Es ist wohl ein einziger Artikel, der den Ausschlag gab – aber es war nicht irgendein Artikel, nicht einmal ein Übersichtsartikel. Es handelte sich um eine 92-seitige Bewertung der ECS, die von Steven Sherwood und Mark Webb geleitet

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

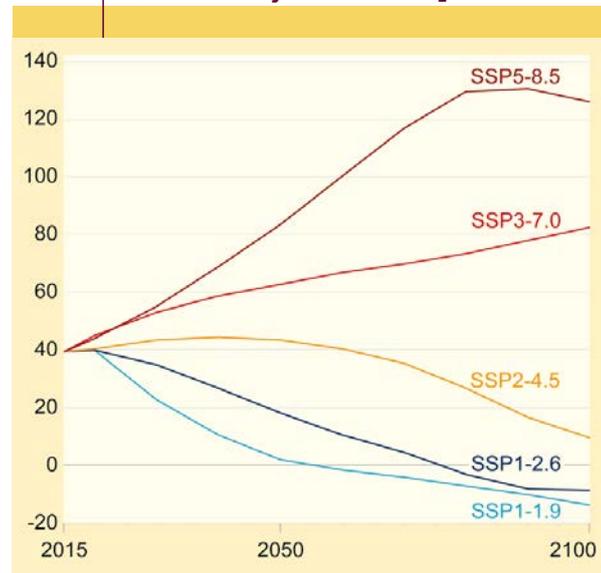


Bei zunehmender Erwärmung könnte sich der artenreiche tropische Regenwald wie hier am Amazonas von einer Kohlendioxid-Senke zu einer Kohlendioxid-Quelle entwickeln. Bereits heute sind viele dieser ökologisch immens wichtigen Waldgebiete von Abholzung und Versteppung bedroht (Bild: D. Eidemüller).

wurde [7]. In diesem Kraftakt wurden die Erkenntnisse aus dem Verständnis der Rückkopplungsprozesse mit den beobachteten Instrumenten- und Paläoaufzeichnungen kombiniert. Durch die sorgfältige Bewertung des aktuellen Wissensstandes und die formale, bayessche Kombination der daraus resultierenden Schätzungen lieferten Sherwood, Webb und Kollegen einen stark reduzierten Unsicherheitsbereich für die ECS und nahmen damit die spätere Bewertung des AR6 vorweg. Entscheidend ist, dass die ECS, wie sie von umfassenden Klimamodellen dargestellt wird, nicht in die Beweisführung einfließt, so dass eine unabhängige Bewertung der ECS von Klimamodellen im Vergleich zu dem bewerteten Bereich möglich ist. (Hier ist vielleicht der Hinweis nützlich, dass ein umfassendes Klimamodell das Klima rein aus physikalischen Grundgesetzen, einigen Hilfsannahmen sowie äußeren Antriebsfaktoren wie chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und Sonnenvariabilität berechnet. Beobachtungsdaten des Klimas selbst fließen nicht in das Modell ein, siehe [8].)

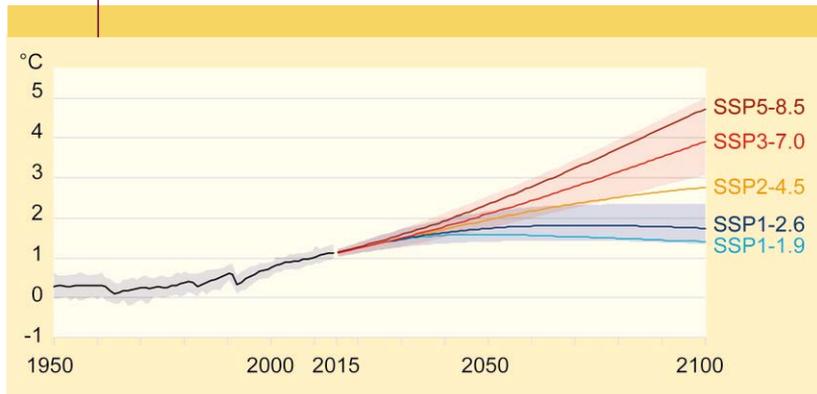
Der Artikel folgte einem Ansatz, der in einem früheren Beitrag der beiden Hauptautoren zusammen mit Bjorn Stevens und Sandrine Bony skizziert worden war [9]. Um die unvermeidlich subjektiven Entscheidungen, die bei allen statistischen Schätzungen getroffen werden, transparent zu machen, wurde in dieser Arbeit, die wiederum auf einem Workshop mit rund dreißig Fachleuten basierte, dafür plädiert, die Plausibilität verschiedener Vorstellungen durch Hypothesentests zu untersuchen. Auf diese Weise konnte eine Leserin selbst entscheiden, ob sie zu den gleichen

ABB. 1 | ZUKÜNFTIGE JÄHRLICHE CO₂-EMISSIONEN



CO₂-Emissionen in Gigatonnen pro Jahr in fünf Szenarien, die von der Arbeitsgruppe I des Weltklimarats IPCC im sechsten Sachstandsbericht AR6 benutzt wurden. Die Zahl nach dem Kürzel SSP beschreibt den Satz an Annahmen über gesellschaftliche Entscheidungen (etwa: 1 für weltweiter Schwerpunkt auf nachhaltige Entwicklung, 5 für starke weitere Nutzung fossiler Brennstoffe). Die Zahl nach dem Bindestrich steht dafür, wie stark der menschengemachte Treibhauseffekt im Jahr 2100 ungefähr sein wird. Dieser Wert wird in Watt pro Quadratmeter angegeben und als Strahlungsantrieb bezeichnet – siehe „Klimadynamik im Emulator“ (nach Abbildung SPM.4a aus [2]).

ABB. 2 | ÄNDERUNG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR



Simulierte Änderung der globalen Oberflächentemperatur von 1950 bis 2100, gegenüber dem Mittel über den Zeitraum von 1850 bis 1900. Die durchgezogenen Linien stellen die beste Schätzung dar. Die Schattierungen geben den Unsicherheitsbereich für die Periode bis 2014 an (grau) sowie für die Szenarien SSP1-2.6 (dunkelblau) und SSP3-7.0 (rot). In die Änderung der globalen Oberflächentemperatur gehen nicht nur die Simulationen mit Klimamodellen ein, sondern auch andere Beweislinien wie die beobachtete Erwärmung der letzten Jahrzehnte sowie Information über die Empfindlichkeit des Klimas gegenüber CO₂-Änderungen (nach Abbildung SPM.8a aus [2]).

Entscheidungen oder Schlussfolgerungen wie die Autoren gekommen wäre.

Klimasensitivität und die neuesten Klimamodelle

Man könnte also denken, beim Verfassen des AR6 sei alles in schönster Ordnung gewesen, denn natürlich hatten sich die Ergebnisse von Sherwood, Webb und Kollegen [7] lange

vor dem Erscheinen der Arbeit herumgesprochen und wurden im entsprechenden Kapitel des AR6 [4] schon im Entwurfsstadium reflektiert. Aber im Jahr 2018 machte eine beunruhigende Nachricht die Runde – einige Klimamodelle der neuesten Generation zeigten gegenüber ihren Vorgängerversionen eine deutlich erhöhte Klimasensitivität [10, 11], mit ECS teils höher als 5 °C. Woher kam das, und was bedeutete das? War das Klimaproblem noch gravierender als bis dahin gedacht, – oder stimmte etwas nicht mit diesen Modellen? Besonders frappierend waren diese Ergebnisse, da eben die zeitgleiche neue Bewertung der ECS die sehr hohen Werte als noch unwahrscheinlicher charakterisierte als vorher.

Es ist bemerkenswert, wie die Forschung auf die Herausforderung reagierte: Innerhalb kurzer Zeit wurden drei verschiedene statistische Verfahren angewandt, um anhand der Erwärmungsbeobachtungen der letzten Jahrzehnte das Modellensemble zu rekalisieren. Weiterhin wurden die Parameter eines einfachen Klimamodells, des „Emulators“, so ausgewählt, dass dieses mit der neuesten Bewertung der Klimasensitivität übereinstimmte (siehe „Klimadynamik im Emulator“ auf S. 277); der Emulator wurde dann ebenfalls für Vorhersagen der künftigen globalen Temperatur benutzt. In ihren Ergebnissen stimmten alle Ansätze – so fundamental unterschiedlich sie auch waren – überein [3]. Was als großes Problem begann, führte zu einer deutlich verringerten Unsicherheitsspanne in der künftig zu erwartenden Erwärmung, im Vergleich zu früheren Berichten. Dadurch konnten wir auch deutlich klarere Aussagen dazu tätigen, was zum Erreichen oder Verfehlen der Pariser Klimaziele führen würde. Abbildungen 1 und 2 zeigen den

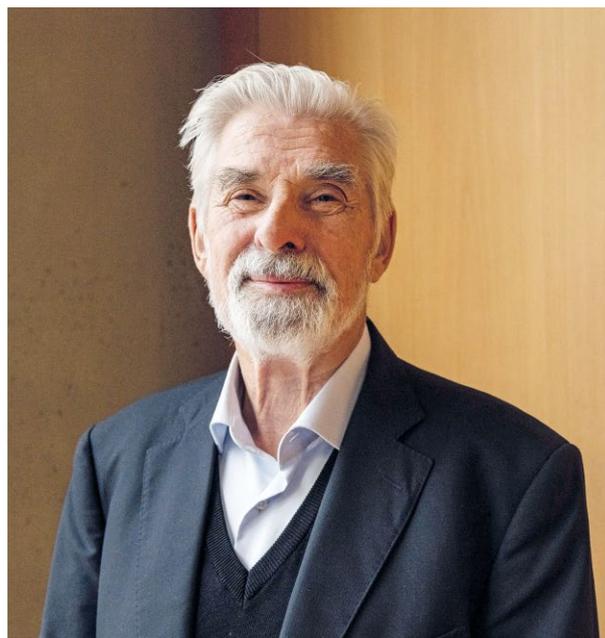
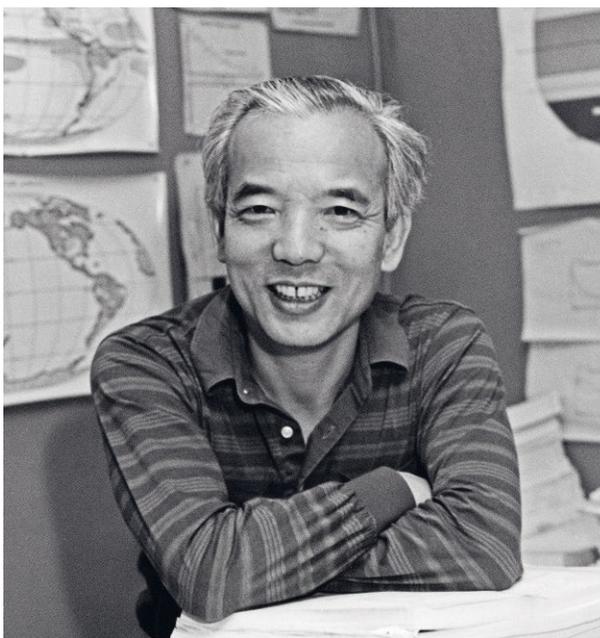
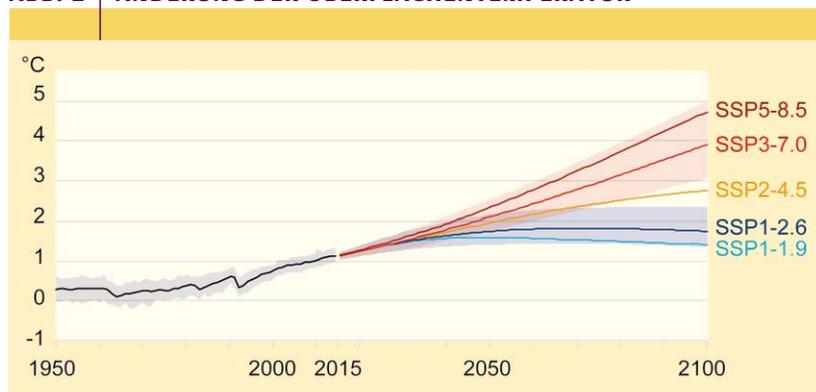


Abb. 3 Syukuro Manabe (links), emeritierter Leitender Wissenschaftler am Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) in Princeton (Foto: GFDL), und Klaus Hasselmann (rechts), emeritierter Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg (Foto: J. Knop, MPG), zwei der Physik-Nobelpreisträger 2021.

ABB. 2 | ÄNDERUNG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR

Simulierte Änderung der globalen Oberflächentemperatur von 1950 bis 2100, gegenüber dem Mittel über den Zeitraum von 1850 bis 1900. Die durchgezogenen Linien stellen die beste Schätzung dar. Die Schattierungen geben den Unsicherheitsbereich für die Periode bis 2014 an (grau) sowie für die Szenarien SSP1-2.6 (dunkelblau) und SSP3-7.0 (rot). In die Änderung der globalen Oberflächentemperatur gehen nicht nur die Simulationen mit Klimamodellen ein, sondern auch andere Beweislinien wie die beobachtete Erwärmung der letzten Jahrzehnte sowie Information über die Empfindlichkeit des Klimas gegenüber CO_2 -Änderungen (nach Abbildung SPM.8a aus [2]).

Entscheidungen oder Schlussfolgerungen wie die Autoren gekommen wäre.

Klimasensitivität und die neuesten Klimamodelle

Man könnte also denken, beim Verfassen des AR6 sei alles in schönster Ordnung gewesen, denn natürlich hatten sich die Ergebnisse von Sherwood, Webb und Kollegen [7] lange

vor dem Erscheinen der Arbeit herumgesprochen und wurden im entsprechenden Kapitel des AR6 [4] schon im Entwurfsstadium reflektiert. Aber im Jahr 2018 machte eine beunruhigende Nachricht die Runde – einige Klimamodelle der neuesten Generation zeigten gegenüber ihren Vorgängerversionen eine deutlich erhöhte Klimasensitivität [10, 11], mit ECS teils höher als 5°C . Woher kam das, und was bedeutete das? War das Klimaproblem noch gravierender als bis dahin gedacht, – oder stimmte etwas nicht mit diesen Modellen? Besonders frappierend waren diese Ergebnisse, da eben die zeitgleiche neue Bewertung der ECS die sehr hohen Werte als noch unwahrscheinlicher charakterisierte als vorher.

Es ist bemerkenswert, wie die Forschung auf die Herausforderung reagierte: Innerhalb kurzer Zeit wurden drei verschiedene statistische Verfahren angewandt, um anhand der Erwärmungsbeobachtungen der letzten Jahrzehnte das Modellensemble zu rekalisieren. Weiterhin wurden die Parameter eines einfachen Klimamodells, des „Emulators“, so ausgewählt, dass dieses mit der neuesten Bewertung der Klimasensitivität übereinstimmte (siehe „Klimadynamik im Emulator“ auf S. 277); der Emulator wurde dann ebenfalls für Vorhersagen der künftigen globalen Temperatur benutzt. In ihren Ergebnissen stimmten alle Ansätze – so fundamental unterschiedlich sie auch waren – überein [3]. Was als großes Problem begann, führte zu einer deutlich verringerten Unsicherheitspanne in der künftig zu erwartenden Erwärmung, im Vergleich zu früheren Berichten. Dadurch konnten wir auch deutlich klarere Aussagen dazu tätigen, was zum Erreichen oder Verfehlen der Pariser Klimaziele führen würde. Abbildungen 1 und 2 zeigen den

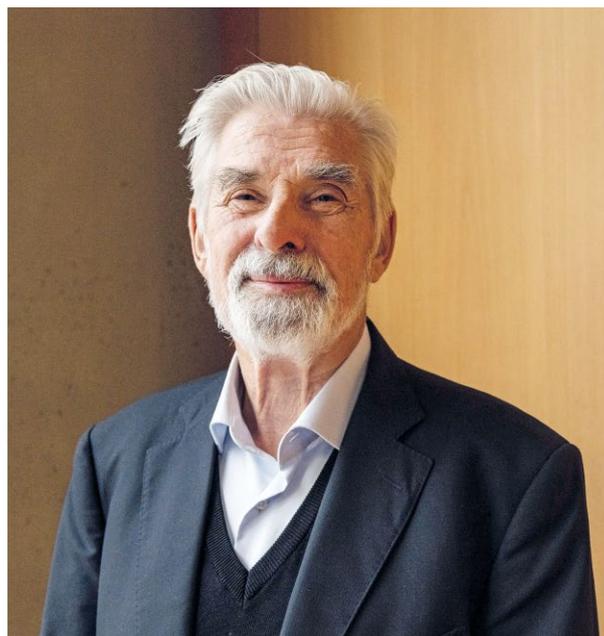
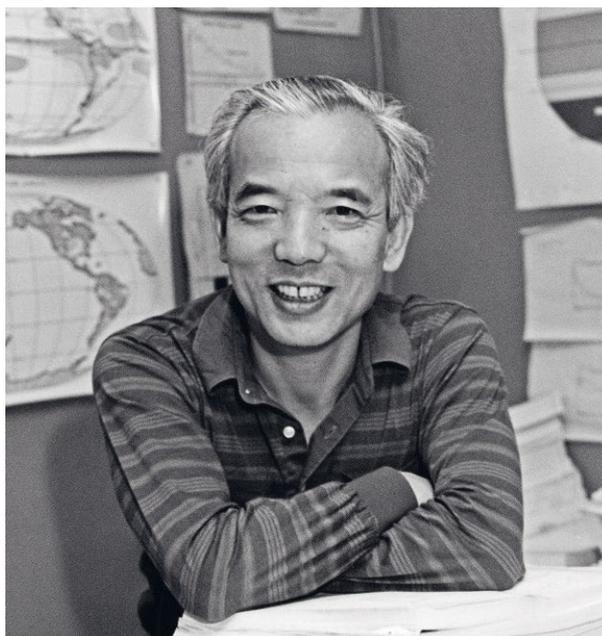


Abb. 3 Syukuro Manabe (links), emeritierter Leitender Wissenschaftler am Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) in Princeton (Foto: GFDL), und Klaus Hasselmann (rechts), emeritierter Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg (Foto: J. Knop, MPG), zwei der Physik-Nobelpreisträger 2021.

nach heutigem Stand der Forschung im neuen IPCC-Bericht ermittelten Zusammenhang von möglichen CO₂-Konzentrationen und globalen Oberflächentemperaturen anhand verschiedener Szenarien.

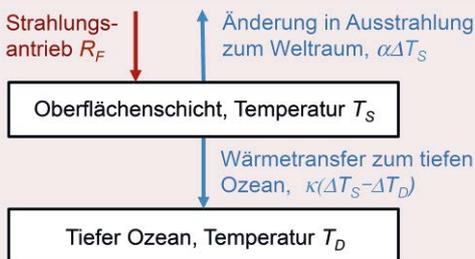
Syukuro Manabes Beitrag – Klimasensitivität

Die oben zitierten Kernaussagen des AR6 beruhen letztlich auf den nobelpreisgekrönten Arbeiten von Syukuro Manabe und Klaus Hasselmann. Beide sind Pioniere in der Entwick-

lung von umfassenden Klimamodellen, in denen thermodynamische und dynamische Prozesse sowohl in der Atmosphäre als auch im Ozean dargestellt werden. Der Nobelpreis allerdings wurde nicht für diese Modellentwicklung im engeren Sinne vergeben, sondern für bahnbrechende Ideen und Erkenntnisse. Diese Erkenntnisse stellen bleibende Werte dar, wohingegen die konkrete Ausgestaltung eines numerischen Modells rasch veraltet, sobald leistungsfähigere Computer zur Verfügung stehen.

KLIMADYNAMIK IM EMULATOR

Als Anwendung der theoretischen Physik im Klimabereich wollen wir kurz betrachten, wie man die Parameter eines einfachen Klimamodells so auswählen kann, dass die Ergebnisse eines komplexen Modells wiedergegeben (emuliert) werden. Hierzu muss man noch ein wenig ausholen und eine zweite Charakterisierung für die Empfindlichkeit des Klimas einführen, die transiente Klimaantwort (Transient Climate Response, TCR). Die TCR gibt uns die global gemittelte Erwärmung zum Zeitpunkt der Verdoppelung in der atmosphärischen CO₂-Konzentration, in einem vereinfachten Szenario, in dem sich die CO₂-Konzentration in jedem Jahr um 1% erhöht. Die Verdoppelung tritt dann nach ungefähr 70 Jahren ein, eine Vervierfachung nach 140 Jahren. Die TCR ist eine wichtige Maßzahl für die „augenblickliche“ Empfindlichkeit, ohne dass man bis zum Erreichen eines neuen Gleichgewichts wartet.



Es ist möglich, ein einfaches Klimamodell so zu definieren, dass jede Kombination von ECS und TCR reproduziert wird, also die charakteristischen Wertepaare der im AR6 gefundenen Unsicherheitsbereiche oder das Wertepaar eines komplexen Klimamodells. Somit kann unser einfaches Modell auch die Entwicklung der global gemittelten Oberflächentemperatur eines komplexen Modells wiedergeben.

Ein erhöhter Treibhauseffekt etwa durch erhöhte CO₂-Konzentration hält Energie im Klimasystem zurück; dieses Zurückhalten wird als Strahlungsantrieb R_F bezeichnet [8]. Als Folge erhöht sich die Oberflächentemperatur T_S um ΔT_S . Dies bewirkt zwei zusätzlich vertikale Energietransporte: Die Erde verliert Energie durch zusätzliche Ausstrahlung in den Weltraum, um die Menge $\alpha \Delta T_S$, und der tiefe Ozean nimmt Wärme auf, $\kappa(\Delta T_S - \Delta T_D)$. Der Einfachheit halber nehmen wir die Koeffizienten α und κ als konstant an.

Eine bestimmte Kombination von ECS und TCR kann jetzt ein-eindeutig durch eine Kombination von α und κ erreicht werden. Für ECS ist das sehr einfach zu sehen. Ein neues Gleichgewicht ist erreicht, wenn die zusätzliche Ausstrahlung zum Weltraum gleich dem Strahlungsantrieb ist,

$$R_F = \alpha \Delta T_S, \text{ im Gleichgewicht.} \tag{1}$$

Da der Strahlungsantrieb $R_{F,2 \times CO_2}$ für eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration gut bekannt ist, bestimmen wir aus dieser speziellen Gleichgewichtserwärmung ECS den Koeffizienten α :

$$\alpha = \frac{R_{F,2 \times CO_2}}{ECS}. \tag{2}$$

Für κ müssen wir etwas weiter ausholen. Zunächst stellen wir fest, dass die thermische Anpassungszeitskala für die Oberflächenschicht nur wenige Jahre beträgt. Daher können wir hier annehmen, die Oberflächenschicht sei in einem Quasi-Gleichgewicht aus Strahlungsantrieb, Strahlungsverlust in den Weltraum und Wärmeabgabe an den tiefen Ozean [22, 23], und die Änderung im Wärmehalt der Oberflächenschicht können wir vernachlässigen. Wir haben also zu jeder Zeit, auch vor Erreichen eines neuen Gleichgewichts, die Beziehung

$$R_F(t) = \alpha \Delta T_S(t) + \kappa [\Delta T_S(t) - \Delta T_D(t)]. \tag{3}$$

Nehmen wir näherungsweise an, dass sich der tiefe Ozean anfänglich noch gar nicht erwärmt hat, bekommen wir also zu jeder Zeit

$$R_F(t) = (\alpha + \kappa) \Delta T_S(t) \Leftrightarrow \Delta T_S(t) = \frac{R_F(t)}{(\alpha + \kappa)} \tag{4}$$

und insbesondere zum Zeitpunkt der CO₂-Verdoppelung

$$TCR = \frac{R_{F,2 \times CO_2}}{(\alpha + \kappa)}. \tag{5}$$

Das können wir nach κ auflösen und erhalten mit (2) für α

$$\kappa = \frac{R_{F,2 \times CO_2}}{TCR} - \alpha = \frac{R_{F,2 \times CO_2}}{TCR} - \frac{R_{F,2 \times CO_2}}{ECS}. \tag{6}$$

Jedes Paar von ECS und TCR entspricht also laut (2) und (6) genau einem Paar von α und κ . So einfach diese Entsprechung aussieht, so scheint sie doch vor dem AR6 [3] nicht benutzt worden zu sein.

In guter Näherung gilt, dass bei einem festen jährlichen prozentualen Zuwachs in der CO₂-Konzentration der Strahlungsantrieb linear ansteigt. Für diesen Fall finden wir eine Lösung auch ohne die Annahme, dass sich der tiefe Ozean nicht erwärmt. Der Fehler für TCR in der vereinfachten Darstellung liegt bei nur 10 bis 15%. Mir ist allerdings nicht bekannt, dass dies einmal durchgerechnet wurde, außer von den Studierenden, die meine Klausur im Jahr 2020 geschrieben haben.

Manabe (Abbildung 3, links) ging der fundamentalen Frage nach, welche Prozesse unverzichtbar sind, um die Klimasensitivität ECS theoretisch vorherzusagen. Bis dahin war die Bestimmung der ECS immer als reines Problem des vertikalen Strahlungstransports angesehen worden, also des Transports kurzwelliger Sonnenstrahlung nach unten und des Transports langwelliger, terrestrischer Strahlung nach oben. Es dauerte allerdings bis Anfang der 1960er-Jahre, bis dieser Strahlungstransport einigermaßen zuverlässig und effizient berechnet werden konnte, von Manabe selbst, zusammen mit dem Deutschen Fritz Möller [12]. Insofern war die detaillierte Ausarbeitung des Strahlungstransports nach einer CO₂-Verdoppelung eine wichtige Leistung.

Es muss aber weit mehr als nur der Strahlungstransport berücksichtigt werden. Manabe erkannte, wie essentiell die Konvektion, also der rasche vertikale Austausch durch Strömungen, für das Problem war (siehe die anschauliche quantitative Ausarbeitung von Axel Kleidon in diesem Magazin, [13]). Manabe erkannte nicht nur die entscheidende Bedeutung von Konvektion als vertikalem Transportmechanismus, er vermochte auch eine angemessen vereinfachte Darstellung in die primitiven Modelle dieser Zeit einzubauen [14].

Der Schlussstein von Manabes Beitrag zur Klimasensitivität ergab sich aus der empirisch gut belegten Erkenntnis,

dass die Atmosphäre zu einigermaßen konstanter relativer Feuchte tendiert, also zu einem konstanten Bruchteil an Wasserdampf gegenüber der bei einer bestimmten Temperatur theoretisch möglichen Menge. Daraus resultiert eine der wichtigsten verstärkenden Rückkopplungen im Klimasystem, dass nämlich bei höherer Temperatur mehr Wasserdampf in der Atmosphäre vorhanden ist und dass dieser Wasserdampf als zusätzliches Treibhausgas die Erwärmung verstärkt [15]. Diese konzeptuelle Entwicklung – Strahlung, Konvektion und konstante relative Feuchte – ist bis heute das Grundgerüst jeder physikalischen Charakterisierung der atmosphärischen Reaktion auf erhöhte CO₂-Konzentrationen. Manabe erhielt damit eine ECS von etwa 2,3 °C, bis heute akzeptiert als der ungefähre Beitrag aus den genannten Prozessen.

Was fehlte, war der Beitrag der Wolken zur gesamten Rückkopplung. Heute sind wir ziemlich sicher, dass der Beitrag verstärkend ist, insofern ist die ECS wahrscheinlich größer als 2,3 °C. Aber der Vergleich mit der modernen Abschätzung aus dem AR6 zeigt, dass Manabes Grundgerüst bis heute Bestand hat.

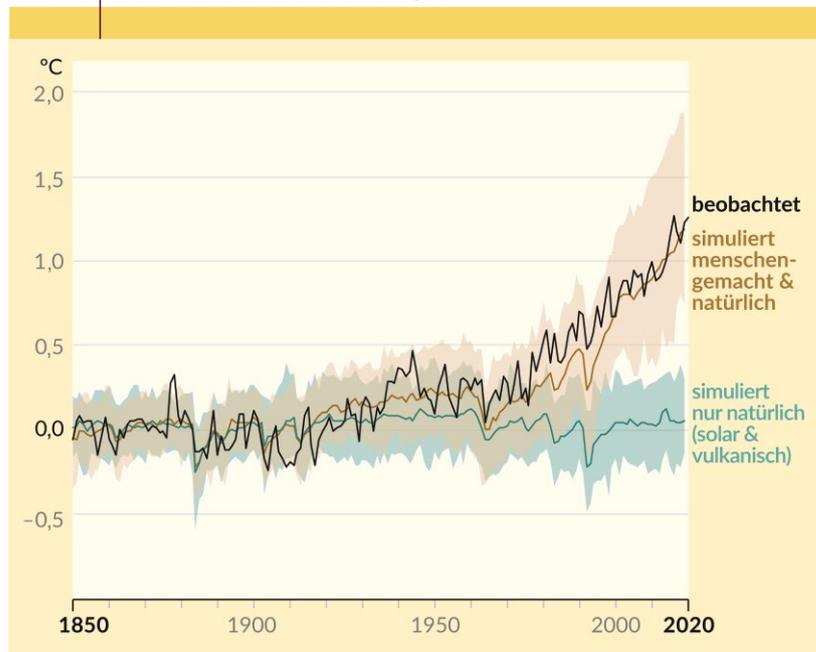
Klaus Hasselmanns Beitrag – der Einfluss des Menschen

Syukuro Manabe fand die wesentlichen Zutaten zu einer Theorie des Treibhauseffekts. Wie aber entdeckt man das viel kleinere Klimawandelsignal im viel größeren Wetterrauschen? Zum Vergleich: Eine globale Erwärmung von 2 °C ist fast die Hälfte des globalen Temperaturunterschieds zwischen heute und dem Höhepunkt der letzten Eiszeit, 5 °C. Global und langzeitlich gemittelt stellen einige Grad Celsius also einen enormen Klimawandel dar, aber eine Messstation dort, wo ich wohne, zeigt im Laufe eines Tages oder eines Jahres viel größere Schwankungen. Wie also erkenne ich den Einfluss des Menschen? Und woher wissen wir, dass die beobachtete globale Erwärmung nicht einfach ein Teil einer natürlichen Schwankung ist?

Hasselmann (Abbildung 3, rechts) formulierte das grundsätzliche Problem erstmals quantitativ und zeigte auch, wie schwer es sein würde, aus einzelnen Stationsdaten das Klimasignal statistisch signifikant herauszulesen, selbst wenn man über die Einzeldaten mittelt [16]. Aus dem Nichts schien dann seine Lösung für das Problem zu kommen: Man benutzt ein Klimamodell, um ein Muster der zu erwartenden Änderung zu erzeugen (Abbildung 4). Dann überprüft man, ob dieses Muster in den Beobachtungen deutlicher zu erkennen ist als durch rein zufälliges Rauschen erklärbar. Wenn ja, hat man ein deterministisches Änderungssignal detektiert. Da es sich um ein univariates statistisches Problem handelt, ist statistische Signifikanz viel leichter zu erlangen als für die multivariate Darstellung vieler Stationsdaten.

Diese Arbeit war ein zunächst wenig beachteter Beitrag in einem eher obskuren Buch, einem Konferenzband mit dem Titel „Meteorologie über den tropischen Ozeanen“, und wurde in den ersten zehn Jahren nur dreißigmal zitiert.

ABB. 4 | DER MENSCHLICHE EINFLUSS



Beobachtete (schwarz) und simulierte Änderung der globalen Oberflächentemperatur, relativ zum zeitlichen Mittel über die Periode 1850 bis 1900. Die Simulationen berücksichtigen einmal sowohl menschengemachte als auch natürliche Einflussfaktoren (braun) und einmal nur die natürlichen (grün). Die Schattierung stellt eine Abschätzung für die Ungewissheit der Simulationen dar. Nur durch natürliche Einflussfaktoren ist die beobachtete Erwärmung unmöglich zu erklären (nach Abbildung SPM.1b aus [2]).

Sie legte aber den Grundstein für eine atemberaubende Entwicklung, wie später in historischen Betrachtungen betont [17, 18]. Allerdings präsentierte die ursprüngliche Arbeit nur die Methode und keine konkrete Anwendung. Dazu musste der Klimawandel fortschreiten, die Datelage sich verbessern und die Klimamodelle mussten weiterentwickelt werden. Die Entdeckung des menschlichen Fingerabdrucks im beobachteten Klimawandel geschah dann Mitte der 1990er-Jahre. Erst zeigten 1996 die Teams um die Postdoktorandin Gabriele Hegerl vom Max-Planck-Institut für Meteorologie [19] sowie um Ben Santer vom Lawrence Livermore National Laboratory [20], ein ehemaliger Postdoktorand von Klaus Hasselmann, dass die Beobachtungen nicht durch Rauschen erklärbar waren – das war zunächst die Entdeckung eines deterministischen Signals. 1997 folgte dann, wiederum durch Gabriele Hegerl und das Team des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, die Zuschreibung – also der Nachweis, dass es die Treibhausgase waren, die das detektierte Signal erzeugten [21].

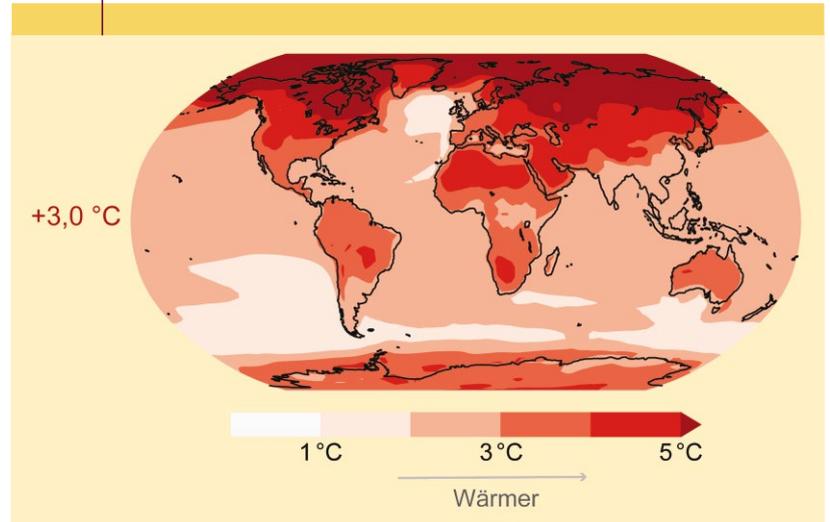
Entdeckung und Zuschreibung (Detection and Attribution, D&A) hat sich zu einem eigenen Unterbereich der Klimaforschung entwickelt, mit eigenen Kapiteln in allen IPCC-Berichten, seit dem Beginn 1990. Für immer mehr Aspekte des Klimageschehens wurde der menschliche Einfluss nachgewiesen. So lässt sich auch die regional zum Teil sehr unterschiedliche Erwärmung, insbesondere in den hohen Breitengraden, im Modell klar nachvollziehen (Abbildung 5). Durch D&A wurde die Richtigkeit der Theorie der globalen Erwärmung, deren wichtigster Protagonist Syukuro Manabe war, belegt. Ohne diesen Nachweis, also letztlich ohne Manabes und Hasselmanns Arbeiten, wäre das Pariser Klimaabkommen undenkbar gewesen. Der Rest ist Geschichte, die im AR6 und im Physiknobelpreis 2021 kulminierte.

Ein Blick hinter die Kulissen

Ich erwähnte oben den Workshop, der maßgeblich zum halbierten Unsicherheitsbereich der ECS im IPCC AR6 führte. Dieser wurde unter der Schirmherrschaft des Weltklimaforschungsprogramms WCRP organisiert, das 2012 beschlossen hatte, „Grand Science Challenge“-Initiativen ins Leben zu rufen, die jeweils ein wichtiges Problem in der Klimaforschung aufgreifen und ihm durch einige Jahre konzentrierter Aufmerksamkeit einen Schub geben sollten. Diese besondere – und nach allen Maßstäben äußerst erfolgreiche – Grand Science Challenge trug den Namen „Wolken, Zirkulation und Klimasensitivität“ und wurde von Sandrine Bony und Bjorn Stevens geleitet, die auch 2015 den Workshop initiierten und leiteten.

Eine wesentliche Errungenschaft des AR6 geht also auf die weltweite Gemeinschaft der Klimaforschung und ihre Strategie zur Bewältigung eines schwierigen wissenschaftlichen Problems vor etwa zehn Jahren zurück. Für mich persönlich schließt sich hier der Kreis: In meinem eigenen Kapitel im AR6 haben wir die neue AR6-Bewertung der ECS

ABB. 5 | GEOGRAPHISCHES MUSTER DER OBERFLÄCHENERWÄRMUNG



Simulierte Änderung der Oberflächentemperatur gegenüber dem Mittel über den Zeitraum von 1850 bis 1900, für eine globale Erwärmung von 3°C. Man erkennt die besonders starke Erwärmung in der Arktis sowie die generell stärkere Erwärmung der Landflächen gegenüber der Ozeanoberfläche. Dieses Muster ist sehr robust und hängt kaum vom Ausmaß der simulierten globalen Erwärmung ab (nach Abbildung FAQ 4.3, Abbildung 1 aus [3]).

entscheidend genutzt, um die erwartete zukünftige globale Erwärmung abzuschätzen [4]. Und als die erste Gruppe von Grand Science Challenges definiert wurde, war ich Mitglied des WCRP-Lenkungsausschusses. Ich bin mir zwar nicht mehr sicher, aber der Gedankengang „Wolken sind der größte Unsicherheitsfaktor bei der Klimasensitivität, also sollten wir eine Grand Science Challenge über die Verbindung dieser beiden definieren“ klingt so naiv, dass ich es sehr wohl gewesen sein könnte, der dieses Thema in die Diskussion geworfen hat.

Ich erinnere mich jedoch genau daran, dass ich vom Ausschussvorsitzenden gebeten wurde, die abschließende Diskussion zu leiten, in der die Themen der Grand Science Challenges festgelegt wurden – in meiner letzten Sitzung als Ausschussmitglied. Der vorgeschlagene Entwurf für das Thema „Wolken und Klimasensitivität“ hatte sich völlig davon entfernt und schlug stattdessen etwas vor, das für mich zu „noch einem weiteren Aerosolprogramm“ zu werden schien. Während Aerosole zweifellos wichtig für Wolkenprozesse sind, drohte die entscheidende Verbindung zwischen Wolken und Klimasensitivität verloren zu gehen. Daher nutzte ich meinen Einfluss als Sitzungsleiter, um den Schwerpunkt wieder dorthin zu lenken, wo er meiner Meinung nach hingehörte. Schließlich stimmte der Ausschuss dem Thema „Wolken, Zirkulation und Klimasensitivität“ zu und ebnete damit den Weg für den Durchbruch im AR6.

INTERNET

Weltklimarat IPCC (alle Berichte zum Download)
<https://www.ipcc.ch>

Zusammenfassung

Der jüngst veröffentlichte 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC konnte einige zentrale Aussagen zum vergangenen und künftigen menschengemachten Klimawandel in bislang nie dagewesener Deutlichkeit tätigen. Es ist eindeutig, dass der Einfluss des Menschen die Atmosphäre, die Ozeane und die Landflächen erwärmt hat. Eine globale Erwärmung zwischen 1,5 °C und 2 °C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden, außer es erfolgen in den kommenden Jahrzehnten drastische Verringerungen der Emission von CO₂ und anderen Treibhausgasen. Diese Aussagen wurden durch die weltweite Zusammenarbeit in der Klimaforschung möglich, die zu einer wesentlich genaueren Abschätzung geführt haben, wie empfindlich die Temperatur auf erhöhte CO₂-Konzentrationen reagiert. Diese gesamte Forschung baut ganz wesentlich auf den Erkenntnissen auf, für die Klaus Hasselmann und Syukuro Manabe 2021 mit dem Physiknobelpreis geehrt wurden.

Stichwörter

Klimawandel, Klimasensitivität, Weltklimarat, IPCC, 6. Sachstandsbericht, Treibhausgasemission.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] IPCC, in: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Hrsg. V. Masson-Delmotte et al.), Cambridge Univ. Press, Cambridge (U.K.) 2021.

- [2] IPCC, Summary for Policymakers, ebenda.
[3] J.-Y. Lee et al., Future global climate: Scenario-based projections and near-term information, ebenda.
[4] P. Forster et al., The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity, ebenda.
[5] S. Arrhenius, Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci. **1896**, 41(251), 237.
[6] J. G. Charney et al., Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment, Nat. Res. Council., Nat. Acad. Sci. 1979.
[7] S. C. Sherwood et al., Rev. Geophys. **2020**, 58(4), e2019RG000678.
[8] J. Marotzke, Physik in unserer Zeit **2014**, 45(3), 118.
[9] B. Stevens et al., Earth's Future **2016**, 4(11), 512.
[10] P. M. Forster et al., Nat. Clim. Change **2020**, 10(1), 7.
[11] G. A. Meehl et al., Sci. Adv. **2020**, 6(26), eaba1981.
[12] S. Manabe, F. Möller, Mon. Weather Rev. **1961**, 89(12), 503.
[13] A. Kleidon, Physik in unserer Zeit **2020**, 51(2), 79.
[14] S. Manabe, R. F. Strickler, J. Atmos. Sci. **1964**, 21(4), 361.
[15] S. Manabe, R. T. Wetherald, J. Atmos. Sci. **1967**, 50, 241.
[16] K. Hasselmann, On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies, in: Meteorology over the Tropical Oceans (Hrsg. D. B. Shaw). Royal Meteorol. Soc., London 1979, 251.
[17] B. D. Santer et al., Nat. Clim. Change **2019**, 9(3), 180.
[18] N. Oreskes, E. M. Conway, Merchants of Doubt: How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming, Bloomsbury, London 2010.
[19] G. C. Hegerl et al., J. Clim. **1996**, 9(10), 2281.
[20] B. D. Santer et al., Nature **1996**, 382(6586), 39.
[21] G. C. Hegerl et al., Clim. Dyn. **1997**, 13(9), 613.
[22] J. Marotzke, P. M. Forster, Nature **2015**, 517(7536), 565.
[23] D. Jiménez de la Cuesta, T. Mauritsen, Nat. Geosci. **2019**, 12(11), 902.

Der Autor



Foto: MPI-M/D. Ausserhofer

Jochem Marotzke ist Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, Professor an der dortigen Universität und stellvertretender Sprecher des Hamburger Klima-Exzellenzclusters. Im fünften und sechsten Sachstandsbericht des IPCC verantwortete er jeweils ein Kapitel als Koordinierender Leitautor, zuletzt über globale Klimaprojektionen. Der Physiker forscht zu Klimavorhersagen und zur Rolle großräumiger Meeresströmungen im Klimageschehen.

Anschrift

Prof. Dr. Jochem Marotzke, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstraße 53, 20146 Hamburg.
jochem.marotzke@mpimet.mpg.de