

Warum schwankt der Klimawandel?

Stratosphärische Veränderungen müssen in langfristigen Klimaprognosen berücksichtigt werden.

Martin Dameris

Seit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert ist die global gemittelte bodennahe Temperatur signifikant gestiegen. Allerdings vollzieht sich der Klimawandel nicht stetig, sondern die Temperatur steigt mal mehr, mal weniger stark an. In den letzten Jahren gab es viele Diskussionen über die sog. Erwärmungspause nach 2000 und ihre möglichen Ursachen. Natürliche Fluktuationen und Veränderungen in der Stratosphäre beeinflussen das Klimasignal in jedem Fall wesentlich. Daher ist es erforderlich, die Variabilität der Stratosphäre und deren langfristige Veränderungen für zuverlässige Klimaprognosen zu berücksichtigen.

Die globale Erwärmung der Erde in den letzten 130 Jahren ist wissenschaftlich gut dokumentiert [1]. Vor allem anthropogene Emissionen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO_2) haben seit Beginn der Industrialisierung dazu geführt, dass sich die bodennahen Temperaturen statistisch signifikant erhöht haben, im Globalmittel um etwa $0,8\text{ }^\circ\text{C}$. Allerdings verlief dieser Temperaturanstieg über die letzten Jahrzehnte nicht stetig, da ihn viele Faktoren beeinflussen. So gab es immer wieder Phasen, in denen sich die Erde stärker oder schwächer erwärmte oder sogar relativ gesehen abkühlte (Abb. 1). Als Bezugspunkt für diese Angaben dient der Temperaturmittelwert der Jahre 1951 bis 2012. Besondere Aufmerksamkeit erhielt in letzter Zeit die Erwärmungspause, die man in den Jahren nach 2000 zu erkennen glaubte [1]: Die bis zum Jahr 2011 verfügbaren Temperaturzeitreihen suggerierten, dass sich die globale Erwärmung deutlich abgeschwächt hat. Aus diesen Daten folgte, dass die global gemittelte Bodentemperatur seit Ende des letzten Jahrhunderts nur um etwa $0,05\text{ }^\circ\text{C}$ pro Jahrzehnt zugenommen hat [1]. In einer Vielzahl wissenschaftlicher Studien ging es um die möglichen Gründe dafür. Neueste Analysen der verfügbaren Temperaturzeitreihen lassen nun Zweifel an der Erwärmungspause aufkommen [2] (Abb. 1). Nach wie vor ist es notwendig und wichtig, die relevanten Einflussfaktoren für Klimaschwankungen bzw. der Veränderungen der Erwärmungsraten sorgfältig zu ermitteln und zu verstehen. Die Kenntnis dieser Variationen ist die Basis für zuverlässige Klimaprognosen.

Das Verständnis und die Vorhersage von Phasen verstärkter oder verlangsamter Klimaänderungen sind eine Herausforderung für die Klimaforschung. Ver-



Globale Spurengasmessungen aus dem Weltraum sind notwendig, um die kurz- und langzeitlichen Klimaveränderungen zu dokumentieren. Dazu soll ab dem

Jahr 2020 beispielsweise das LIDAR-Instrument der deutsch-französischen Satellitenmission MERLIN (Methane Remote Sensing LIDAR) dienen.

lässliche Aussagen zur Entwicklung des Klimas über Jahre bis Jahrzehnte sind aber für wirtschaftliche und politische Überlegungen nötig und Voraussetzung dafür, dass sich Industrie und Gesellschaft besser den Gegebenheiten anpassen können. Daher ist es wichtig, die entsprechenden physikalischen und chemischen Prozesse und ihre Wechselwirkungen zu verstehen. In diesem Zusammenhang spielt die Stratosphäre, also die Atmosphärenschicht zwischen etwa 12 und 50 km Höhe (Abb. 2), als Teil des Klimasystems eine wichtige Rolle. Insbesondere hat es dort in den letzten 15 Jahren

KOMPAKT

- Seit Ende des 19. Jahrhunderts hat sich die Temperatur im globalen Mittel um $0,8\text{ }^\circ\text{C}$ erhöht.
- Seit dem Jahr 2000 scheint sich die globale Temperatur weniger stark erhöht zu haben als vorher. Aktuellste Daten und neue Analysen deuten nicht auf eine globale Erwärmungspause hin. Die geringere Erwärmung lässt sich unter anderem mit natürlichen Vorgängen erklären.
- Zuverlässige Voraussagen für das Klima der nächsten Jahre bis Jahrzehnte müssen Vorgänge innerhalb der Stratosphäre berücksichtigen.
- Diese enthält auch die Ozonschicht, die sich dank internationaler Vereinbarungen erholen wird.

Prof. Dr. Martin Dameris, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Physik der Atmosphäre, Oberrpaffenhofen, 82230 Weßling

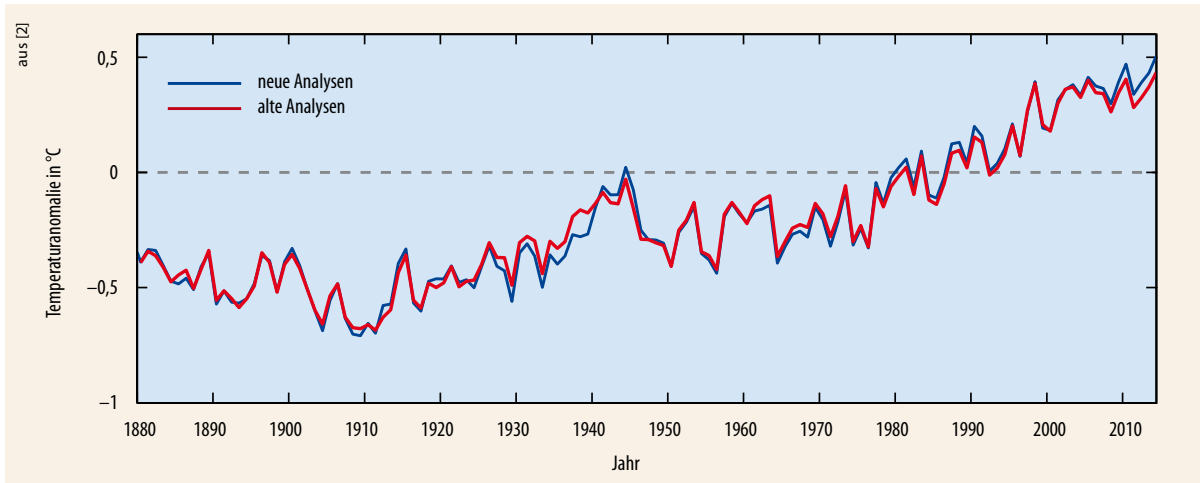


Abb. 1 Zwischen 1880 und 2014 schwankte die gemittelte globale Temperatur stark, tendenziell ist sie aber angestiegen. Dargestellt ist die Abweichung der global gemittelten Oberflächentemperatur der Erde relativ zum Mittelwert des

Bezugszeitraums von 1951 bis 2012. Verglichen sind alte und neue Analysen, unter anderem basierend auf unterschiedlichen Abwägungen und Bewertungen der gemessenen Land- und Ozeantemperaturen [2] sowie unter Ein-

schluss der Daten aus dem besonders warmen Jahr 2014. Neue Analysen (blau) lassen Zweifel an der Erwärmungspause aufkommen, da die Kurve vor allem seit 2008 deutlich oberhalb der alten (rot) liegt.

wesentliche Veränderungen gegeben, welche die Erwärmungsrate deutlich beeinflusst haben.

Ein natürliches Treibhaus

Die von der Sonne emittierte Strahlung treibt Wetter und Klima auf der Erde an. Sie umfasst ein breites Spektrum elektromagnetischer Wellen von der harten Röntgenstrahlung ($< 0,1$ nm Wellenlänge) bis zu langwelliger Radiostrahlung mit Wellenlängen im Bereich von Metern. Am intensivsten ist sie in den Wellenlängenbereichen der UV-Strahlung (100 – 380 nm), des sichtbaren Lichts (380 – 780 nm) und des nahen Infrarots (< 3000 nm). Das Maximum der Strahlungsintensität liegt bei etwa 500 nm. Die solare Strahlung wird in der Atmosphäre teilweise reflektiert und absorbiert, oder sie durchdringt die Erdatmosphäre und erwärmt die Oberfläche. Die erwärmte Erde emittiert ihrerseits Infrarot-Strahlung (Wärmestrahlung) zurück in die Atmosphäre, wobei die Wellenlängen vor allem zwischen 3 und 50 μm liegen mit maximaler Intensität bei etwa 10 μm . Der Unterschied zwischen der von der Sonne und der Erde ausgehenden Wärmestrahlung resultiert aus den unterschiedlichen Oberflächentemperaturen der Sonne (≈ 6000 K) und der Erde (≈ 288 K).

In der Erdatmosphäre vorhandene Gase absorbieren die von der Erde ausgesendete Infrarot-Strahlung teilweise und verursachen damit eine Erwärmung der Troposphäre, also der untersten atmosphärischen Schicht, die sich vom Erdboden bis in etwa 12 km Höhe erstreckt (Abb. 2). Zu diesen natürlichen Treibhausgasen zählen vor allem Wasserdampf (H_2O ; etwa 60 % Anteil am Treibhauseffekt), Kohlendioxid (CO_2 , etwa 25 % Anteil), Ozon (O_3 , etwa 8 % Anteil), aber auch Methan (CH_4) und Distickstoffmonoxid (N_2O , Lachgas). Insgesamt sorgt dieser natürliche Treibhauseffekt dafür, dass sich nahe der Erdoberfläche im

globalen Mittel eine Temperatur von etwa 288 K, also $+15^\circ\text{C}$, einstellt. Andernfalls hätten die bodennahen Luftschichten lediglich eine Temperatur von rund 255 K (-18°C).

Treibhausgase emittieren aber auch selbst Infrarot-Strahlung, wobei die Emission von der lokalen Atmosphärentemperatur abhängt. In der Stratosphäre emittieren Treibhausgase in der Regel mehr Infrarot-Strahlung als sie absorbieren, wodurch sich die Stratosphäre abkühlt. Da die Temperatur in der Stratosphäre bedingt durch die Ozonschicht nach oben hin ansteigt, nimmt die Emission von Infrarot-Strahlung mit der

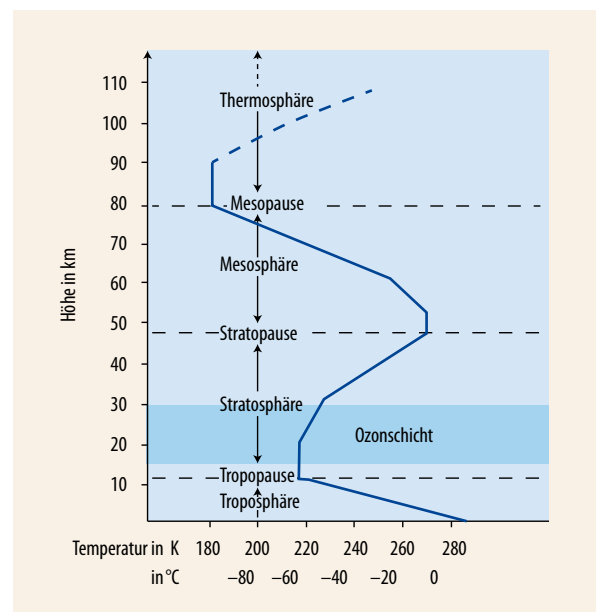


Abb. 2 Die mittlere Temperaturverteilung variiert in der Erdatmosphäre vom Erdboden bis in etwa 110 km Höhe (blaue Kurve). Die Einteilung der Atmosphärenschichten erfolgt mittels des vertikalen Temperaturgradienten. Die maximalen Ozonkonzentrationen liegen in einer Höhe von 15 bis 30 km (stratosphärische Ozonschicht).

Höhe zu und ist nahe der Stratopause in etwa 50 km Höhe am größten. Der Abkühlungseffekt durch Treibhausgase variiert mit der geografischen Breite, da er vom Gleichgewicht zwischen der Absorption von Infrarot-Strahlung (im Wesentlichen von unten) und ihrer lokalen Emission abhängt. Verändern sich die Konzentrationen der Treibhausgase in der Erdatmosphäre beispielsweise durch menschliche Aktivitäten, so ändert sich das Gleichgewicht der Strahlungswirkung von der einfallenden solaren (kurzwelligigen) Strahlung und der ausgehenden terrestrischen Wärmestrahlung. Dies beeinflusst unmittelbar das Temperaturprofil in der Atmosphäre.

Durch die höheren Treibhausgaskonzentrationen hat sich zeitgleich zu der sich erwärmenden Troposphäre die Stratosphäre in den letzten Jahrzehnten deutlich abgekühlt. Dies belegen entsprechende Temperaturmessungen und deren Analysen [3, 4]. Der Rückgang der stratosphärischen Ozonschicht verstärkte in den letzten Jahrzehnten die Abkühlung in der unteren Stratosphäre ([5], Kap. 4). Eine Reihe natürlicher Vorgänge in der Atmosphäre, zum Beispiel der 11-jährige Sonnenaktivitätszyklus oder starke Vulkanausbrüche, modifizieren aber die stratosphärische Abkühlung.

Luftmassen in Bewegung

Die Temperaturverteilung in der Atmosphäre beeinflusst auch deren Dynamik und damit die dort wirkenden Kräfte. Somit verändern sich sowohl in der Troposphäre als auch in der Stratosphäre die resultierenden Luftbewegungen und Zirkulationsmuster. Ein prominentes Beispiel ist die stratosphärische Meridionalzirkulation, auch Brewer-Dobson-Zirkulation genannt (Abb. 3). Dieses Zirkulationssystem ist der bedeutendste Antrieb für den Transport von stratosphärischen Luftmassen aus niederen in höhere geografische Breiten. Kennzeichnend für diesen Prozess sind aufsteigende Luftmassen in den Tropen. Dort steigt Luft aus der Troposphäre in die Stratosphäre auf und wird hier polwärts in beide Hemisphären transportiert, besonders intensiv während der jeweiligen Wintermonate. Aufgrund der Massenerhaltung sinken stratosphärische Luftmassen in höheren Breiten ab, was unter anderem dazu führt, dass stratosphärische Luft zurück in die Troposphäre gelangt.

Der Klimawandel modifiziert auch die antreibenden Prozesse der Brewer-Dobson-Zirkulation und damit sowohl die Intensität der Luftmassentransporte als auch die Transportwege [7]. Das hat möglicherweise nachhaltige Konsequenzen für die atmosphärische Verteilung von klimarelevanten Spurengasen, was wiederum zu rückkoppelnden Effekten auf die Tempe-

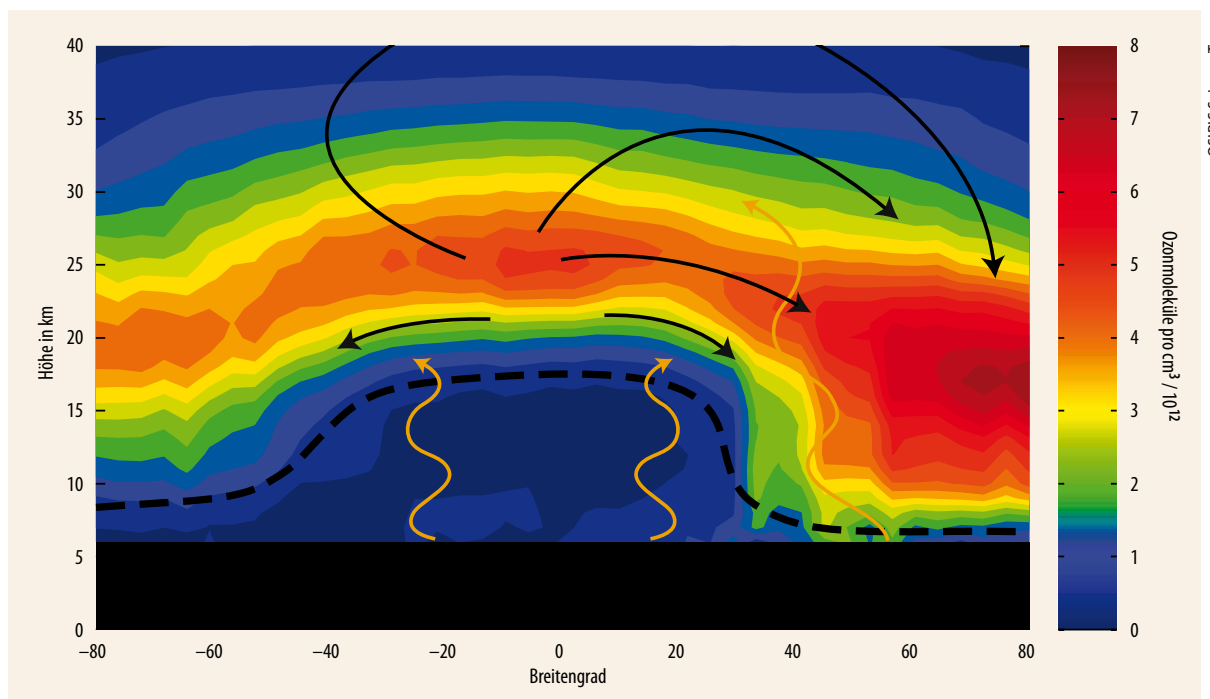


Abb. 3 Die Brewer-Dobson-Zirkulation transportiert stratosphärische Luftmassen und beeinflusst die Ozonverteilung. Dargestellt ist die zonal gemittelte vertikale Ozonverteilung im nordhemisphärischen Frühjahr (hier 2004). Unterhalb von 5 km Höhe liegen keine Satelliten gestützten Ozonmessdaten vor (schwarzer Balken). Die schwarzen Pfeile bezeichnen die stratosphärische Meridional-

zirkulation, die Luftmassen aus tropischen Regionen in höhere Breiten in die untere Stratosphäre transportiert. Großskalige atmosphärische Wellen mit Wellenlängen von einigen tausend Kilometern, die z. B. durch Land-See-Kontraste entstehen, treiben die Meridionalzirkulation an (orangefarbene Pfeile). Auf der jeweiligen Winterhemisphäre ist die Wechselwirkung dieser Wellen mit dem

zonalen Grundstrom am intensivsten, somit ist dort die Brewer-Dobson-Zirkulation besonders ausgeprägt. Demzufolge wird im Frühjahr mehr Ozon in der Frühlingshemisphäre (in der Abbildung der rechte Teil) gemessen. Die gestrichelte schwarze Linie kennzeichnet die Tropopause [6].

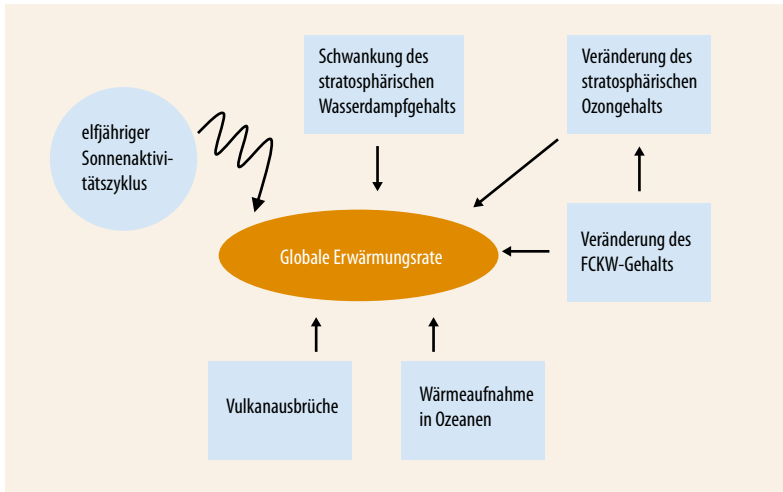


Abb. 4 Viele Faktoren beeinflussen die globale Erwärmungsrate: Neben der internen, natürlichen Variation des Klimasystems haben die Wärmeaufnahme der Ozeane, die Aktivität der Sonne und Vulkanausbrüche einen Einfluss auf die Stärke des Erwärmungssignals. Veränderungen in der Zusammensetzung der Stratosphäre (hier FCKW, Ozon und Wasserdampf) spielen eine wichtige Rolle.

raturverteilung führt. Eine Intensivierung der Brewer-Dobson-Zirkulation bewirkt, dass sich die Atmosphäre außerhalb der Tropen erwärmt (adiabatisches Absinken) und die tropische Atmosphäre abkühlt (adiabatisches Aufsteigen). Dies beeinflusst in den Tropen vor allem den Eintrag von troposphärischen Luftmassen in die Stratosphäre; aber die Zirkulation transportiert dann auch in höheren Breiten verstärkt stratosphärische Luftmassen in die Troposphäre. Die Umverteilung von strahlungsaktiven Gasen kann wiederum auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und auch auf chemische Prozesse rückkoppeln.

Die Veränderung der stratosphärischen Ozonschicht ist hier ein bekanntes Beispiel. Eine der Hauptaussagen des letzten internationalen Sachstandsberichts der World Meteorological Organization (WMO) zur Situation der Ozonschicht war, dass sich in den vergangenen drei Jahrzehnten das bodennahe Klima der Südhemisphäre vor allem in den Sommermonaten durch das antarktische Ozonloch im Frühling signifikant verändert hat [5]. Die deutliche Abkühlung der Stratosphäre beeinflusst die troposphärische Zirkulation, was sich regional unterschiedlich auf die Bodentemperaturen und den Niederschlag auswirkt [5]. Dieser Befund macht deutlich, dass Veränderungen in der Stratosphäre direkt die Troposphäre und somit Wetter und Klima beeinflussen. Stratosphärische Veränderungen müssen also bei der Analyse und Bewertung der beobachteten Klimaschwankungen und hinsichtlich der weiteren Entwicklung des Klimawandels Beachtung finden.

Faktoren des Klimas

Eine Reihe von wissenschaftlichen Artikeln beschäftigten sich im Zusammenhang mit der im fünften Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) angesprochenen globalen Erwärmungspause.

Sie diskutierten mögliche Ursachen und relevante Prozesse, welche zu verringerten globalen Erwärmungsraten führen könnten [1]. Meist lag der Fokus dieser Studien auf den in der Vergangenheit ermittelten Einflussfaktoren, die Schwankungen des Klimawandels erklären. Sie erwähnen aber den Einfluss der Stratosphäre auf das globale Klimasignal oft nur am Rande.

Aktuelle Ergebnisse der Klimaforschung deuten auf eine Reihe von möglichen Ursachen für die scheinbare Erwärmungspause (Abb. 4):

- **Natürliche Variabilität:** Die interne, natürliche Variabilität des Klimasystems überlagert und modifiziert die extern beeinflusste Rate der atmosphärischen Erwärmung [8]. Individuelle Komponenten des Klimasystems (d. h. die Atmosphäre zusammen mit den Ozeanen, Seen und Flüssen, dem Eis und Schnee, den Böden sowie der Biosphäre) und deren Wechselwirkungen untereinander (z. B. durch die Interaktion der Luft- und Meeresströmungen) beeinflussen die Erwärmung. In der Folge kann die Temperatur auf Zeitskalen von Jahren und Jahrzehnten schwanken. Dieser Effekt ist kaum zu quantifizieren und daher schwer vorherzusagen, denn die Antriebe hierfür sind in der Regel chaotischer Natur.

- **Wärmeaufnahme der Ozeane:** Die reduzierte globale Erwärmung in den letzten Jahren könnte das Resultat einer höheren Wärmeaufnahme in den unteren Ozeanschichten sein. Dies ist das Ergebnis einer umfassenden Studie [9]. Darin fanden sich Hinweise, dass sich die Wärmeaufnahme der tiefen Ozeane in den letzten Jahren intensiviert hat. Zu ähnlichen Ergebnissen führten in-situ-Messungen und Re-Analysedaten, welche die Wege der Wärmeaufnahme in Ozeanen ermittelten [10].

- **Sonnenaktivität:** Der elfjährige Aktivitätszyklus der Sonne beeinflusst die Temperatur der Atmosphäre und das Klima [11]. Die reduzierte solare Einstrahlung während des letzten Aktivitätszyklus, mit einer außergewöhnlich lang anhaltenden Phase reduzierter Sonnenaktivität zwischen 2005 und 2011, hat dazu geführt, dass sich die Erdoberfläche weniger erwärmt hat [12].

- **Vulkanausbrüche:** Seit 2000 hat sich die Menge atmosphärischer Aerosole (Gemisch aus festen oder flüssigen Schwebeteilchen) erhöht. Wahrscheinlich hat durch eine Reihe kleiner Vulkanausbrüche die Menge an Schwefelteilchen in der Stratosphäre zugenommen. Dadurch verringerte sich die globale Erwärmungsrate in den letzten Jahren [13].

Alle diese Prozesse können die globale Erwärmungsrate modifizieren und die viel diskutierte Erwärmungspause teilweise oder ganz erklären. In diesem Zusammenhang ist auch die Rolle der Stratosphäre wichtig. Jüngste Beobachtungen liefern deutliche Hinweise, dass stratosphärische Veränderungen ebenfalls an der reduzierten globalen Erwärmung der letzten Jahre beteiligt waren.

Schutz der Ozonschicht

Die Rolle der Stratosphäre in Verbindung mit dem Klimawandel wird seit vielen Jahren intensiv untersucht, unter anderem im Zusammenhang mit der Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht [5, 9, 14]. Zwischen 1960 und 2000 kühlte sich die Stratosphäre deutlich um etwa 0,8 °C pro Jahrzehnt in 20 km Höhe ab [4]. Grund dafür war zum einen die Abnahme des stratosphärischen Ozongehalts, die zu einer geringeren Erwärmung durch Absorption solarer Strahlung geführt hat. Zum anderen stieg der Gehalt an Treibhausgasen an, vor allem CO₂. Hier sind auch die Fluorchlorkohlenwasserstoffe zu nennen, welche die Ozonschicht schädigen und gleichzeitig als Treibhausgase agieren. Das Treibhauspotential der FCKW (pro Molekül) ist um ein Vielfaches höher als das von CO₂ (Tabelle). Die Ozon zerstörenden Substanzen, hier vor allem die FCKW mit etwa 12 Prozent (0,32 W/m²), tragen zum direkten Strahlungsantrieb aller langlebigen Treibhausgase bei, also zur Veränderung der Energiebilanz der Erde durch externe Faktoren. Dies lässt sich auf Grundlage von Konzentrationsmessungen aus dem Jahr 2005 abschätzen [15]. Alle halogenierten Kohlenwasserstoffe zusammengenommen trugen 2011 mit etwa 0,36 W/m² zum Treibhauseffekt bei. Die beiden wichtigsten FCKWs – CFCl₃ und CF₂Cl₂ – hatten 2011 mit etwa 0,23 W/m² einen stärkeren Strahlungsantrieb als das drittichtigste, anthropogen veränderte Treibhausgas N₂O [1].

Derzeit reduzieren erhöhte Konzentrationen von Fluorchlorkohlenwasserstoffen die Ozonschicht immer noch deutlich. Dieser stratosphärische Ozonabbau zeigt sich insbesondere durch das antarktische Ozonloch. Dieser Effekt ist auch für den Klimawandel von Bedeutung [5, 16]. Durch das Montrealer Protokoll von 1987, einer Vereinbarung zum Schutz der Ozonschicht, und entsprechende Nachfolgereinbarungen wurden die Ozon zerstörenden Substanzen reglementiert. Seit 1995 sind die Produktion und der Gebrauch von FCKW grundsätzlich weltweit verboten. Als Folge geht seitdem der troposphärische FCKW-Gehalt stetig zurück. Die Konzentration von chlor- und bromhaltigen Substanzen in der Stratosphäre sank seit Ende des letzten Jahrhunderts um 10 bis 15 Prozent [5]. Die untere Stratosphäre kühlt sich seit etwa 2000 deutlich langsamer ab, da in dieser Zeit der Ozonabbau nicht weiter zugenommen hat.

Somit haben die Montrealer Vereinbarungen nicht nur bewirkt, dass sich die Ozonschicht erholt, sondern sie haben auch direkt zum Klimaschutz und zu einer reduzierten globalen Erwärmung beigetragen. Derzeit ist davon auszugehen, dass sich die Ozonwerte in der Stratosphäre Mitte dieses Jahrhunderts wieder normalisieren [5]. Grund für diese lange Zeitspanne sind die atmosphärischen Lebenszeiten der FCKW von einigen zehn Jahren. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass der Klimawandel die weitere Entwicklung der Ozonschicht merklich beeinflussen wird. Im globalen Mittel ist zu erwarten, dass sich eine mächtigere Ozonschicht ent-

wickeln wird, wobei regionale Unterschiede auftreten können [17]. Da Ozon auch als Treibhausgas agiert, sorgen hohe Ozonkonzentrationen für eine Erwärmung der Erdoberfläche. Im Vergleich zum erhöhten CO₂ trägt die erwartete Zunahme der Ozonkonzentration in der unteren und mittleren Stratosphäre (Ozonschicht) in den nächsten Jahren nur zu einer sehr geringen Erwärmung der bodennahen Schichten bei.

Einflussreicher Wasserdampf

Eine andere Veränderung in der Stratosphäre wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht und diskutiert: der zunächst beobachtete Anstieg des Wasserdampfgehalts zwischen 1980 und 2000 sowie der plötzliche, sehr markante Rückgang der Wasserdampfkonzentration nach 2000. Da Wasserdampf das wichtigste klimarelevante Gas ist, lassen sich Klimaänderungen nur erklären, wenn seine räumlichen und zeitlichen Fluktuationen bekannt sind.

Der längste, kontinuierliche Datensatz über stratosphärischen Wasserdampf stammt von einer einzelnen Messstation (Boulder, Colorado, USA). Er basiert auf Ballon getragenen „Frostpoint Hygrometer“-Messungen, die seit 1980 etwa einmal im Monat stattfinden [18]. Seit 1992 gibt es zusätzlich entsprechende von Satelliten gestützte globale Beobachtungen. Diese Messreihen dokumentieren einen kontinuierlichen Anstieg des Wasserdampfgehalts bis zum Jahr 2000. Eine Hauptquelle von stratosphärischem Wasserdampf ist Methan (CH₄), da dort CH₄ zu Wasser oxidiert. Der Methangehalt der Atmosphäre hat sich von etwa 900 ppb im Jahr 1900 bis 2010 etwa verdoppelt [19]. Methan ist Hauptbestandteil von Erdgas und entsteht unter anderem beim Abbau von organischem Material (z. B. beim Nassreisbau, durch Tierhaltung, auf Deponien). Somit ist der Anstieg des stratosphärischen Wasserdampfgehalts zu einem großen Teil durch höhere Methankonzentration zu erklären. Des Weiteren gelangt etwa die Hälfte des stratosphärischen Wasserdampfs direkt durch vertikalen Transport aus der Troposphäre durch die tropische, kalte Tropopause in die Stratosphäre. Rechnungen mittels Klima-Chemie-Modellen bestätigen den Wasserdampfanstieg zwischen 1980 und 2000 qualitativ [20] und zeigen, dass dies zu etwa 30 Prozent zur Klimaerwärmung beigetragen hat [21].

Im Jahr 2000 hat die stratosphärische Wasserdampfkonzentration innerhalb weniger Monate abrupt um zehn Prozent abgenommen, was nicht mit veränderten

Treibhauspotential verschiedener Substanzen	
Treibhausgas	Treibhauspotential (relativ zu CO ₂) pro Molekül
Kohlendioxid, CO ₂	1
Methan, CH ₄	~25
Distickstoffmonoxid, N ₂ O	~300
Fluorchlorkohlenwasserstoffe, FCKW	~10 000

Methankonzentrationen zu erklären ist. Simultan zu diesem abrupten Rückgang kühlte sich die tropische Tropopausenregion, verbunden mit einem deutlich stärkeren Aufsteigen tropischer Luftmassen, ab. Diese Veränderungen stehen im Zusammenhang mit starken El Niño- bzw. La Niña-Ereignissen in den Jahren 1997 und 1998. Bei diesen unregelmäßigen Ereignissen treten große Veränderungen des ozeanografisch-meteorologischen Systems im Bereich des äquatorialen Pazifiks auf. In den folgenden etwa fünf Jahren blieb der stratosphärische Wasserdampfgehalt relativ niedrig und stieg dann wieder langsam an [22]. Analysen und Abschätzungen zeigten, dass der reduzierte stratosphärische Wasserdampfgehalt, verglichen mit einer Atmosphäre, bei der nur entsprechende Veränderungen der Konzentrationen von Kohlendioxid und andere Treibhausgase berücksichtigt wurden, einen verlangsamten Anstieg der Bodentemperaturen von etwa 25 Prozent zwischen 2000 und 2009 bewirkt [21]. Somit verändern natürliche Schwankungen der stratosphärischen Wasserdampfkonzentration das Klimasignal deutlich. Das zeigt, dass markante und auch kleinere natürliche Schwankungen des stratosphärischen Wasserdampfs im Zusammenhang mit Signaturen des Klimawandels zu beachten sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Eine Reihe von natürlichen Vorgängen und Faktoren im Klimasystem der Erde beeinflussen die Erwärmungsraten auf Zeitskalen von Jahren und Jahrzehnten. Andererseits kann menschliches Handeln direkt die Troposphäre und Stratosphäre verändern. Zweifelsfrei schreitet die globale Erwärmung seit Beginn der Industrialisierung durch erhöhte Treibhausgaskonzentrationen stetig voran. Allerdings gibt es immer wieder Phasen, in denen sich die Erwärmungsraten verstärken oder abnehmen. Mögliche Ursachen für kurzzeitige wie längerfristige Fluktuationen sind bekannt, aber im Detail noch nicht ausreichend verstanden. Wenn es darum geht, die Stärke des globalen Klimasignals und dessen Schwankungen vollständig zu beschreiben, spielen die Stratosphäre und ihre Variabilität eine mitentscheidende Rolle. Daher sind weitere Untersuchungen der komplexen Wechselwirkungen zwischen dynamischen, physikalischen und chemischen Prozessen in der Stratosphäre notwendig. Ferner ist es erforderlich, die stratosphärischen Einflüsse auf die globale Erwärmungsrate zu quantifizieren und vertieft nachzuforschen, was stratosphärische Veränderungen und Variationen für die Troposphäre bedeuten. Solche Erkenntnisse gilt es dann, in Klimamodellen entsprechend zu berücksichtigen, um Klimaentwicklungen für Jahre bis Jahrzehnte zuverlässiger vorherzusagen.

Danksagung

Herzlichen Dank an Michael Ponater und Matthias Nützel für inhaltliche Diskussionen sowie kritische Anmerkungen. Die Arbeiten von MD werden unterstützt durch das EU-Projekt StratoClim (Stratospheric and upper tropospheric processes for better climate predictions), die DFG-Forscherguppe SHARP (Stratospheric Change and its Role for Climate Prediction) und das BMBF-Forschungsprojekt MiKlip (Mittelfristige Klimaprognosen).

Literatur

- [1] T. F. Stocker et al. (Hrsg.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, 1535 (2013)
- [2] T. R. Karl et al., *Science* **348**, 1469 (2015)
- [3] J. Nash und R. Saunders, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**, 2103 (2015)
- [4] W. J. Randel et al., *J. Geophys. Res.* **114**, D02107 (2009)
- [5] World Meteorological Organization (WMO), *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 55*, 416, Genf (2014)
- [6] T. A. Shaw und T. G. Shepherd, *Nature Geoscience* **1**, 12 (2008)
- [7] N. Butchart, *Rev. Geophys.* **52**, 157 (2014)
- [8] J. Marotzke und P. M. Forster, *Nature* **517**, 565 (2015)
- [9] G. A. Meehl et al., *Nature Climate Change*, **1**, 360 (2011)
- [10] X. Chen und K.-K. Tung, *Science* **345**, 897 (2014)
- [11] J. D. Haigh et al., *Nature* **467**, 496 (2010)
- [12] P. Stauning, *Atmos. Clim. Sci.* **4**, 60 (2014)
- [13] B. D. Santer et al., *Geophys. Res. Lett.* **42**, 500 (2015)
- [14] D. S. Stevenson, *Nature Climate Change* **5**, 21 (2015)
- [15] S. Solomon et al. (Hrsg.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge Univ. Press, New York (2007)
- [16] M. Dameris, *Angew. Chem. Int. Ed.* **49**, 8092 (2010)
- [17] World Meteorological Organization (WMO), *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 52*, 516, Genf (2011)
- [18] D. F. Hurst et al., *J. Geophys. Res.* **116**, D02306 (2011)
- [19] A. Ghosh et al., *Atmos. Chem. Phys.* **15**, 2595 (2015)
- [20] V. Eyring et al. (Hrsg.), *SPARC CCMVal Report on the Evaluation of Chemistry-Climate Models*, SPARC Report No. 5, www.sparc-climate.org/publications/sparc-reports/sparc-report-no5 (2010)
- [21] S. Solomon et al., *Science* **32**, 1219 (2010)
- [22] W. J. Randel und E. J. Jensen, *Nature Geoscience* **6**, 169 (2013)

DER AUTOR

Martin Dameris studierte an der Universität zu Köln Geophysik und Meteorologie und promovierte dort 1987. Bis 1991 leitete er die Arbeitsgruppe „Mittlere Atmosphäre“ an der Universität zu Köln. Seit 1991 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Physik der Atmosphäre am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Oberpfaffenhofen. Zudem ist Martin Dameris Apl. Prof. an der LMU München und Autor von mehr als 100 wissenschaftlichen Publikationen.

