



Sachstand

Ausgewählte Aspekte der Auswirkungen von CO₂ auf den Klimawandel

Ausgewählte Aspekte der Auswirkungen von CO₂ auf den Klimawandel

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 012/20
Abschluss der Arbeit: 13. März 2020
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,
Bildung und Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Konsensfrage	4
3.	Einfluss von Sonnenstrahlung	5
4.	Relevanz von Wolkenbildung	8
5.	Einfluss von Wasserdampf	9
6.	CO₂-Sättigung bei Pflanzen	11
7.	Qualität der Klimamodelle	12

1. Einleitung

In der Öffentlichkeit werden das Ausmaß des Klimawandels, seine Ursachen und die sich ergebenden Handlungsoptionen nach wie vor kontrovers diskutiert.

Bei der Diskussion lassen sich drei „Ebenen“ unterscheiden. Erstens gibt es gut verstandene und wissenschaftlich abgesicherte Grundlagen. Weiterhin existiert auf der zweiten Ebene in Teilfragen eine (wissenschaftliche) Diskussion über einzelne Unsicherheiten. Zu diesen Fragen besteht somit noch Forschungsbedarf. Dieser Komplex umfasst insbesondere Einzelaspekte der Wolkenbildung und Prognosen der weiteren Klimaentwicklung. Zuletzt ist die Ebene der Maßnahmen Diskussion zu nennen. Sie umfasst Fragen, welche konkreten politischen Handlungen auf Grundlage dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse getroffen werden sollen und welche Risiken akzeptiert werden können. Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit einzelnen Fragen der beiden erstbenannten Komplexe, d.h. mit wissenschaftlich gut verstandenen Grundlagen sowie mit einzelnen Aspekten der zweiten Ebene. Bei diesen (z.B. der Wolkenbildung und Klimaprognose) gibt es Forschungsfragen, die derzeit noch eingehender untersucht werden.

In dieser Arbeit wird zu einzelnen klimawandelrelevanten Themen, die sich aus dem zugrundeliegenden Auftrag ergeben, die wissenschaftliche Diskussion dargestellt und zumeist knapp erläutert, inwiefern Erkenntnisse aus der Klimaforschung vorliegen. Die Liste erhebt weder einen Anspruch auf Vollständigkeit, noch erfolgt die Reihenfolge der Einzelthemen einem inhaltlichen Kriterium.

Die angegebenen Internetseiten wurden zuletzt am 3. März 2020 abgerufen.

2. Konsensfrage

Die Frage, ob der derzeit festzustellende Klimawandel auf der Erde zu einem überwiegenden Teil menschengemacht ist (anthropogen) oder gegebenenfalls andere, vom Menschen weder direkt noch indirekt zu beeinflussende Faktoren, hauptsächlich dafür verantwortlich sind, wird in der Öffentlichkeit immer wieder aufgeworfen.

In dieser öffentlichen Debatte wird oftmals auf einen Konsens von über 90 Prozent der (Klima-)Wissenschaftler verwiesen. Dies bezieht sich auf verschiedene Studien, die untersuchen, in welchem Maße Klimawissenschaftler nach derzeitigem Erkenntnisstand davon ausgehen, dass **menschlichen Treibhausgas-Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) der ausschlaggebende Faktor für die globale Erwärmung sind (anthropogen bedingte Erderwärmung)**. In einer Arbeit der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages aus dem Jahr 2018 wurden verschiedene solcher Publikationen vorgestellt, die das Ausmaß des Konsenses zu dieser Grundlagenfrage analysieren. Verglichen wurden dabei Studien, die in einem in der Wissenschaft üblichen und erprobten Peer-Review-Prozess evaluiert wurden.¹

1 Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Zum wissenschaftlichen Diskurs einzelner Aspekte des Klimawandels, WD 8 – 3000 – 067/2018, im Internet abrufbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/568324/12e8c64d9738bab5db8956c16a8f174a/WD-8-067-18-pdf-data.pdf>.

Hierbei ist zu beachten, dass sich ein sogenannter **Konsens innerhalb der Wissenschaft** auf andere Weise etabliert als beispielsweise in der Politik. In der Wissenschaft kommt ein Konsens dadurch zustande, dass unabhängig voneinander verschiedene Forschergruppen (teilweise auch unterschiedlicher Teildisziplinen unter Anwendung unterschiedlicher Methoden) zu gleichartigen Schlussfolgerungen gelangen. Das Ableiten dieser Schlussfolgerungen auf Basis eines vorgegebenen Methodensets wird durch Evaluationsverfahren (insbesondere Peer-Reviewing) auf seine Validität hin überprüft. Es geht insbesondere darum festzustellen, dass es derzeit keine wissenschaftlich begründeten Gegenargumente für den Herleitungsprozess der gewonnenen Erkenntnisse gibt.

Bewegt man sich im Bereich der Fragen, die der ersten Kategorie (gut verstandene Grundlagen) zuzurechnen sind, kommen die unterschiedlichsten Teildisziplinen mit gänzlich unterschiedlicher Methodik zu ähnlichen Schlussfolgerungen. Bewegt man sich auf der zweiten Ebene (wissenschaftliche Diskussion) existieren einzelne Detailfragen, zu denen noch Forschungsfragen an sich offen sind und im Rahmen von Forschungsprojekten ergründet werden (z.B. Wolkenbildung). Somit handelt es sich bei der wissenschaftlichen Konsensfrage nicht um eine Meinungsfrage. Es handelt sich vielmehr um die Abgrenzung von Fragen, die entweder „gut“ verstanden werden oder zu denen es noch einzelne offene Forschungsfragen gibt.

Selbstverständlich existieren auch vereinzelt Publikationen, die unter Maßgabe eines der Studie zugrundeliegenden Methodensets zu Schlussfolgerungen gelangen, die Zweifel an einem überwiegend durch Menschen verursachten Klimawandel äußern. Stichprobenartig wurden in einer Arbeit der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages aus dem Jahr 2018 drei derartige peer-reviewed Studien und ein Auszug ihrer kritischen wissenschaftlichen Diskussion dargestellt. Bei allen Studien erfolgte eine anschließende wissenschaftliche Diskussion, die der jeweiligen Studie methodische und/oder sachliche Mängel entgegenhielt.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Formulierung von sogenannten „**Unsicherheiten**“. Auch dieser Begriff wird oftmals in der Öffentlichkeit in anderer Weise genutzt als in der Wissenschaft. Naturgemäß ist mit jeder Messung eine Unsicherheit, die sich in der Darstellung von Fehlerbalken niederschlägt, verbunden. Die Angabe eines derartigen Fehlerbalkens bedeutet somit gerade nicht, dass mit gleicher Wahrscheinlichkeit jegliche Werte in diesem Bereich auftreten können. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Extremwerte der Fehlerbalken eintreten, ist äußerst gering. Es ist also möglich, zu definieren, welche Werte mit welcher Wahrscheinlichkeit eintreten werden.

3. Einfluss von Sonnenstrahlung

Die Sonne ist ein bedeutender Klimafaktor, und das Erdklima ist das Ergebnis einer Energiebilanz. Die abgestrahlte Wärme gleicht die absorbierte Sonnenstrahlung aus. Das bedeutet: Wird insgesamt weniger Energie ins Weltall wieder abgestrahlt als auf der Erde eintrifft, hat das eine Erwärmung der Erde zur Folge (positive Energiebilanz). Auf der anderen Seite: ist die Abstrahlung größer als das Eintreffen, hat dies eine Abkühlung zur Folge (negative Energiebilanz).

Die auf der Erde verfügbare Energie stammt größtenteils (in Form von elektromagnetischer Strahlung) von der Sonne. Diese Sonnenenergie wird in alle Richtungen von ihr gleichmäßig abgestrahlt. Dabei bestimmt die Entfernung von der Sonne, wieviel dieser Energie auf einem Planeten

eintrifft. Im Fall der Erde sind es im Mittel ca. 340 W/m^2 solare Energie, die den oberen Rand der Atmosphäre erreichen.³

Welcher Anteil der Strahlung die Erdoberfläche erreicht, hängt von einer Reihe von Prozessen ab. Ein Teil wird durch Wolken, Atmosphäre und Aerosole reflektiert oder durch die Atmosphäre absorbiert. Auf der Erdoberfläche selbst treffen ca. 161 W/m^2 ein. Dahingegen strahlt die Erdoberfläche ca. 397 W/m^2 in Form von langwelliger Wärmestrahlung ab. Aber auch hier spielen verschiedene Effekte eine Rolle. Nur ein kleiner Teil entweicht ungehindert durch die Atmosphäre in das Weltall. Der größte Anteil wird aufgrund der Absorptionseigenschaften der Atmosphäre und den darin enthaltenen natürlichen Treibhausgasen in diese aufgenommen. Dadurch entsteht eine atmosphärische Gegenstrahlung von ca. 324 W/m^2 , die wieder in Richtung Erdoberfläche zurückstrahlt.⁴ Diese Energiebilanzierung findet sich zahlreichen Publikationen. Diese sind durch Messungen untermauert und gelten als gut verstanden.⁵

Häufig findet man Darstellungen, die auf eine Grafik zurückgehen, die sich im 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates findet. Diese Darstellungen der „Working Group I (The Physical Science Basis)“ zum 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates aus dem Jahr 2013 berufen sich in ihrer grafischen Darstellung der Energiebilanz der Erde auf eine Publikation aus dem Jahr 2012/2013⁶ von Martin Wild et al.⁷

2 Watt pro Quadratmeter; Die Strahlung, die auf der Erdoberfläche eintrifft, wird als „Momentanwert“ in der Einheit der Bestrahlungsstärke gemessen (W/m^2). Indem man diese Werte über eine Zeitspanne summiert, erhält man eingestrahltene Energie über bestimmte Zeiträume hinweg (gemessen in kWh/m^2).

3 Siehe hierzu auch Grafik 1.

4 Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG, Wien:
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/umsetzungen/energiebilanz-der-erde>.

5 Siehe hierzu: Seite 181 in: Climate Change 2013: The Physical Science Basis; Chapter 2, WORKING GROUP I; Abrufbar im Internet unter: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf.

6 Eingereicht wurde die Arbeit 2012, gedruckt im Jahr 2013.

7 Quelle: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00382-012-1569-8.pdf>.

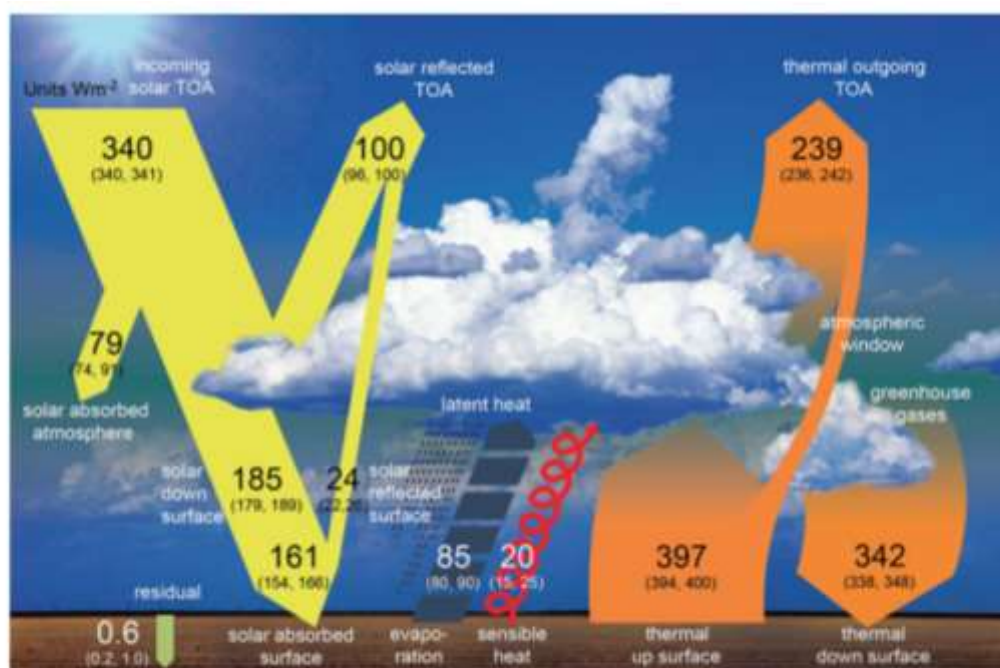


Fig. 1 Schematic diagram of the global mean energy balance of the Earth. Numbers indicate best estimates for the magnitudes of the globally averaged energy balance components together with their

uncertainty ranges, representing present day climate conditions at the beginning of the twenty first century. Estimates and uncertainty ranges based on discussion in Sect. 5. Units Wm^{-2}

8

Tritt eine wie auch immer bedingte Änderung der Energiebilanz ein, sind Klimaänderungen die logische Folge. Aus physikalischer Sicht ist der anthropogene Klimawandel vorrangig eine Störung der globalen mittleren Energiebilanz (global mean energy balance) infolge einer Veränderung der atmosphärischen Zusammensetzung von Treibhausgasen und Aerosolen.⁹ Die Zunahme an atmosphärischem CO_2 verursacht einen zusätzlichen Strahlungsantrieb („anthropogenen“ Treibhauseffekt) der nun zum natürlichen Treibhauseffekt hinzukommt. Dies führt in der Energiebilanzierung zu einer Veränderung und in der Folge zu einer Erdoberflächenerwärmung.¹⁰

Auch die ankommende Sonnenstrahlung unterliegt natürlichen Schwankungen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stellt sich die Lage aber derart dar, dass verschiedene Indikatoren der Sonnenaktivität auf eine Abkühlung hindeuten. In den vergangenen Jahrzehnten war die Sonnenaktivität im

8 Wild, M., D. Folini, C. Schär, N. Loeb, E. G. Dutton, and G. König-Langlo, 2013: The global energy balance from a surface perspective. *Clim. Dyn.*, 40, 3107-3134.

9 Ebd.

10 Entwicklung der wichtigsten IPCC Kernaussagen:
https://www.ffe.de/download/kurzberichte/Kurzfassung_FfE_IPCC.pdf.

Wesentlichen konstant, bis auf einen rund elfjährigen sogenannten Schwabezyklus¹¹ (der im Wesentlichen wenig Wirkung auf die globale Temperatur zeigt) und einen leichten Abwärtstrend.¹²

4. Relevanz von Wolkenbildung

Auch Wolken haben einen starken Einfluss auf das Erdklima. Wie in der obigen Grafik 1 ersichtlich, beeinflussen sie den Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Auf der einen Seite reflektieren sie die kurzwellige Sonnenstrahlung und auf der anderen Seite absorbieren und emittieren sie langwellige Wärmestrahlung. Hinzu kommt, dass Wolken ein wichtiger Faktor im Wasserkreislauf der Atmosphäre sind. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt – basierend auf unterschiedlichen Klimamodellen – gehen Klimaforscher davon aus, dass die Netto-Wolken-Klima-Rückkopplung¹³ die globale Erwärmung verstärken wird. Allerdings bleibt die Intensität dieser Verstärkung unsicher.¹⁴ Bekannt ist, dass sog. hohe Wolken die globale Erwärmung verstärken, da sie mit Infrarotstrahlung interagieren, die von der Atmosphäre und von der Erdoberfläche abgestrahlt wird. In geringerer Höhe gibt es noch Forschungsbedarf, inwiefern Wolkenrückkopplungen, die mit dem Bedeckungsgrad und dem Reflexionsvermögen im Allgemeinen verbunden sind, Auswirkungen haben.

Aufgrund der Tatsache, dass es noch eine Reihe ungelöster Fragen im Zusammenhang mit der Erforschung der Wechselwirkung zwischen Wolkenbildung und Klima gibt, hat ein Forschungskonsortium bestehend aus European Research Council (ERC), der Max-Planck-Gesellschaft (MPG), dem Centre National de Recherche Scientifique (CNRS), der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology (CIMH), dem Natural Environment Research Council (NERC) und

-
- 11 Der ca. 11-jährige Sonnenfleckenzyklus wird als Schwabe-Zyklus bezeichnet. Während dieses Zyklus‘ verändert sich die die Anzahl der dunklen Flecken (Sonnenflecken) auf der Sonnenoberfläche: Sie steigt von einem Minimum auf ein Maximum und dann zurück auf das Minimum über einen Zeitraum von ca. 11 Jahren. (<https://pubs.usgs.gov/fs/fs-0095-00/fs-0095-00.pdf>).
 - 12 Siehe beispielsweise: Mike Lockwood, Claus Fröhlich: Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature; 463 Proceedings of the Royal Society A; <http://doi.org/10.1098/rspa.2007.1880>. Einen allgemein verständlichen Artikel hat der Klimawissenschaftler Stefan Rahmstorf 2012 in der Zeitschrift Spektrum veröffentlicht: Stefan Rahmstorf: Welche Rolle spielt die Sonne? Spektrum vom 8. Februar 2012; im Internet abrufbar unter: https://www.spektrum.de/kolumne/welche-rolle-spielt-die-sonne/1141490?_ga=2.6703031.468849831.1581949740-1169747487.1581949740.
 - 13 Unter Abzug aller Reflektions-, Verstärkungs- und Absorptionsprozesse, die durch Wolken bedingt die Abstrahlung von Wärme ins Weltall beeinflussen (behindern oder verstärken). Siehe hierzu auch: <https://www.spektrum.de/news/das-wolkenparadoxon/1560204>.
 - 14 IPCC 2014: Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg, Bonn, 2017. <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-7-1.html>.

dem Weltklimaforschungsprogramm (WCRP) die sogenannte EUREC⁴A- Feldstudie gestartet.¹⁵ Die Feldstudie ist eine internationale Initiative zur Unterstützung der Grand Science Challenge des Weltklimaforschungsprogramms zu Wolken, Zirkulation und Klimasensitivität. Ziel der Studie ist es, Theorien über die Rolle von Wolken und Strömungstransport für den Klimawandel durch umfangreiche Messungen in der Atmosphäre und im Ozean zu überprüfen. Verschiedene Klimamodelle hatten vorhergesagt, dass sich durch die Erderwärmung in den Tropen, die heute noch von breiten Wolkenbändern bedeckt sind, künftig weniger Wolken bilden könnten. „Die dunklen Land- und Meeresoberflächen würden dann mehr Sonnenlicht absorbieren, sich weiter aufheizen und den Klimawandel auf diese Weise weiter ankurbeln. Einfachere Modelle kamen in der Vergangenheit zu gegenteiligen Ergebnissen. Um zu klären, ob die positive Rückkopplung eintritt und wie stark sie gegebenenfalls ausfallen wird, haben 40 Forschungseinrichtungen das EUREC⁴A-Projekt aufgesetzt. Es baut auf einer jahrzehntelangen Zusammenarbeit mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology auf Barbados auf.“¹⁶

Die Ableitungen aus unterschiedlichen Modellen sind auch Gegenstand eines Begleitartikels zu einem 2014 in Nature erschienenen Artikel, in dem verschiedene Klimamodelle verglichen werden und ein Prozess identifiziert wird, der die Unterschiede zwischen den Modellen erklären kann.¹⁷ In dem Begleitartikel wird darauf hingewiesen, dass mit den Erkenntnissen, die im Forschungsartikel dargelegt wurden, die Debatte um die Klimasensitivität noch nicht beendet sei, und zahlreiche Faktoren in Zukunft noch mit einbezogen werden müssten.¹⁸

5. Einfluss von Wasserdampf

Im Rahmen des natürlichen Treibhauseffektes, wie er oben beschrieben wurde, stellt Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas in folgender Hinsicht dar: Man geht davon aus, dass der überwiegende Anteil des **natürlichen Treibhauseffekts** auf der Erde durch Wasserdampf verursacht wird, und nur ein wesentlich geringerer auf CO₂ zurückzuführen ist.¹⁹ In Klimamodellen werden diese Fakten berücksichtigt. Bei der anthropogenen Klimaerwärmung ist wichtig, dass der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre stark von der Temperatur bestimmt wird. Steigt die Temperatur

15 Projektseite: <http://eurec4a.eu/index.php?id=4201>; Pressemeldung der Max-Planck-Gesellschaft vom 17. Januar 2020: <https://www.mpg.de/14371836/eurec4a-wolken-klimawandel>.

16 Max-Planck-Gesellschaft: Wolken aus allen Perspektiven, Pressemitteilung vom 17. Januar 2020.

17 Sherwood, S., Bony, S. & Dufresne, J. Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. *Nature* 505, 37–42 (2014). <https://doi.org/10.1038/nature12829>.

18 Shiogama, H., Ogura, T. Clouds of uncertainty. *Nature* 505, 34–35 (2014). <https://doi.org/10.1038/505034a>; <https://www.nature.com/articles/505034a>.

19 Stefan Rahmstorf, Potsdam Institute for Climate Impact Research: Wie funktioniert eigentlich der Treibhauseffekt? Februar 2003, Informationsseite. Quelle: http://www.pik-potsdam.de/~stefan/leser_antworten.html.

der Erde steigt auch der Wasserdampfgehalt und kann damit verstärkend wirken.²⁰ Das Deutsche Klima-Konsortium beschreibt unter Verweis auf die wissenschaftlichen Grundlagen zum Bericht des Weltklimarates aus dem Jahr 2014²¹ die Auswirkungen nach derzeitigem Kenntnisstand wie folgt:

„Anthropogene Emissionen haben hingegen einen signifikanten Einfluss auf Wasserdampf in der Stratosphäre²², der Schicht in der Atmosphäre oberhalb von etwa 10 km Höhe. Erhöhte Methankonzentrationen (CH₄) aufgrund von Aktivitäten des Menschen führen über Oxidation zu einer zusätzlichen Wasserquelle, was die beobachteten Veränderungen in dieser Schicht der Atmosphäre teilweise erklärt. Diese Änderung des stratosphärischen Wassers hat Einfluss auf die Strahlung, wird als ein Antrieb betrachtet und kann abgeschätzt werden. Die stratosphärischen Wasserdampfkonzentrationen schwankten in den letzten Jahrzehnten signifikant. Das volle Ausmaß dieser Schwankungen wird noch nicht ganz verstanden und ist wahrscheinlich weniger ein Antrieb als ein Rückkopplungsprozess, der zur natürlichen Variabilität hinzukommt. Der Beitrag von stratosphärischem Wasserdampf zur Erwärmung, sowohl als Antrieb wie auch durch Rückkopplung, ist sehr viel kleiner als der durch CH₄ oder CO₂. Die maximale Menge an Wasserdampf in der Luft wird durch die Temperatur reguliert. Eine typische Luftsäule, die sich in Polarregionen von der Erdoberfläche bis zur Stratosphäre erstreckt, kann nur ein paar Kilogramm Wasserdampf pro Quadratmeter enthalten, während in einer gleichen Luftsäule in den Tropen bis zu 70 kg Wasserdampf pro Quadratmeter enthalten sein können. Mit jedem zusätzlichen Grad Lufttemperatur kann die Atmosphäre etwa 7 % mehr Wasserdampf halten. Dieser Konzentrationsanstieg verstärkt den Treibhauseffekt und führt daher zu mehr Erwärmung. Dieser Prozess, der als Wasserdampfrückkopplung bezeichnet wird, ist gut verstanden und quantifiziert. Er kommt in allen Modellen vor, die zur Abschätzung des Klimawandels genutzt werden und seine Stärke dort stimmt mit Beobachtungen überein. [...] Zurzeit hat Wasserdampf den größten Treibhauseffekt in der Erdatmosphäre. Andere Treibhausgase, vor allem CO₂, sind jedoch notwendig, um die Anwesenheit von Wasserdampf in der Atmosphäre aufrechtzuerhalten. Würden diese anderen Gase aus der Atmosphäre entfernt, würde ihre Temperatur tatsächlich genügend absinken, um eine Abnahme des Wasserdampfes zu verursachen, was zu einem ungebremsten Rückgang des Treibhauseffektes führen und dadurch die Erde in einen gefrorenen Zustand stürzen würde. Demnach stellen die anderen Treibhausgase neben Wasserdampf diejenigen Temperaturbedingungen bereit, die das gegenwärtige Niveau atmosphärischen Wasserdampfes aufrechterhalten. Folglich stellt Wasserdampf, auch wenn CO₂ die wichtigste anthropogene Stellschraube für das

-
- 20 Der Einfluss von H₂O und CO₂ auf den Treibhauseffekt sowie der Einfluss der Infrarot-Absorption von H₂O und CO₂ sind Gegenstand einer Argumentationsschrift zum Thema „Argumente gegen den anthropogenen Treibhauseffekt und ihre Widerlegung“ von Prof. Dr. M. Schmitt (Hochauflösende UV-Laserspektroskopie an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf). Er veranstaltet seit dem vergangenen Jahr eine Ringvorlesung (Klimakrise), in der verschiedene Experten Vorträge halten. Die Materialien (teilweise mit Filmmaterial) sind im Internet abrufbar: <http://www.ak-schmitt.hhu.de/klimakrise.html>.
- 21 IPCC 2014: Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg, Bonn, 2017.
- 22 zweite Schicht der Erdatmosphäre.

Klima ist, eine starke und schnelle Rückkopplung dar, die jeden Initial-Antrieb um einen Faktor zwischen typischerweise zwei und drei verstärkt. Wasserdampf ist kein signifikanter Initial-Antrieb, aber trotzdem ein grundlegender Akteur des Klimawandels.“²³

6. CO₂-Sättigung bei Pflanzen

Grüne Pflanzen nehmen CO₂ aus der Luft auf. Es gibt zwei Arten von Pflanzen, die sogenannten **C3- und C4- Pflanzen**. Der Name C3-Pflanzen leitet sich aus dem ersten Molekül ab, das bei der Fixierung von Kohlenstoff entsteht: ein Molekül mit drei Kohlenstoff-Atomen mit den Namen 3-Phosphoglycerat. Tatsächlich zählen die meisten Pflanzen zu den C3-Pflanzen, beispielsweise Weizen und Reis. Bei den sogenannten C4-Pflanzen wird statt des 3-Phosphoglycerats bei der CO₂-Fixierung eine Verbindung mit vier Kohlenstoffatomen, Oxalacetat, gebildet. Im Gegensatz zu C3-Pflanzen ist diese Kohlenstofffixierung in tropischen und subtropischen Klimaverhältnissen effektiver. Daher findet man in diesen Klimazonen die meisten C4-Pflanzen, z.B. Mais, Zuckerrohr und Hirse.

Wissenschaftliche Studien haben ergeben, dass eine Erhöhung des CO₂-Gehalts in der Luft zu größeren Erträgen (insbesondere bei C3-Pflanzen) führen kann. Hierzu müssen sich allerdings auch andere beeinflussende Faktoren ändern²⁴. Somit ist die Wirkung einer höheren CO₂-Konzentration komplex und hängt von verschiedenen Einflüssen ab. Darum ist es auch schwierig, den Effekt quantitativ abzuschätzen.

In einer Studie aus dem Jahr 2016 wird über ein langfristiges globales Veränderungsexperiment berichtet, bei dem kalifornisches Grünland mehreren individuellen und gleichzeitigen Änderungen wie Temperatur, Niederschlag, Kohlendioxid und Stickstoff ausgesetzt wurde. Die Analyse belegt nichtlineare und interaktive Auswirkungen von Temperatur und Niederschlag auf die Grünland-Netto-Primärproduktion. Durch Zugabe von Stickstoff wurde das Maximum der Produktion erhöht, und durch Zugabe von CO₂ wurde er auf niedrigere Temperaturen verschoben. Der Ansatz wurde durch andere Experimente bestätigt, die zeigten, dass über Jahre hinweg nicht produktionsverstärkende Effekte (z.B. Wachstumsraten, Erträge etc.) auftraten. Gegebenenfalls kann dieser Ansatz auf andere Ökosysteme angewandt werden, so dass sich die Auswirkungen mit mehreren Faktoren untersuchen ließen.²⁵

23 Quelle: <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-8-1.html>.

24 Dieser Effekt hängt sehr stark von der betrachteten Pflanzenart ab (siehe beispielsweise: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28306971>) oder von der Bewässerung und den Temperaturverhältnissen (S. 93 ff in: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/dk039488.pdf).

25 Kai Zhu et al.: Nonlinear, interacting responses to climate limit grassland production under global change; PNAS September 20, 2016 113 (38) 10589-10594; first published September 6, 2016 <https://doi.org/10.1073/pnas.1606734113>.

Außerdem wurde in einer anderen Studie festgestellt, dass die Produktivität von Eukalyptuswäldern auf einem Boden mit niedrigem Phosphorgehalt durch ein erhöhtes CO₂-Angebot nicht positiv beeinflusst wurde.²⁶ Eine Abhängigkeit von zur Verfügung stehendem Stickstoff wiederum ist Gegenstand einer Arbeit aus dem Jahr 2006.²⁷

Hieran zeigt sich, dass nicht pauschal gesagt werden kann, dass zusätzliches CO₂ in der Atmosphäre als Dünger wirke und das Pflanzenwachstum steigert. Während C4- Pflanzen bereits derzeit bei ihrer Aufnahme-Sättigung liegen²⁸, kann bei C3-Pflanzen im Gewächshaus durch zusätzliche CO₂-Begasung eine Zunahme des Pflanzenwachstums erreicht werden. Allerdings ist dies nicht ohne weiteres auf die Natur übertragbar. Hier kann infolge der Beschränkung des Angebots der anderen Nährstoffe nicht sämtliches zusätzliches CO₂ aufgenommen werden bzw. in weiteres Pflanzenwachstum umgesetzt werden.²⁹

7. Qualität der Klimamodelle

Klimamodelle sind notwendig, um beispielsweise Vorhersagen für die zukünftige Entwicklung des Erdklimas durchführen zu können. In einem Modell wird grundsätzlich die Realität vereinfacht dargestellt. Damit es ein besonders treffendes Abbild der Realität ist, müssen die wichtigsten Einflussfaktoren des abgebildeten Systems erkannt, berücksichtigt und aufgenommen werden. Aufgrund der Tatsache, dass unser Klimasystem sehr komplex ist und maßgeblich von zahlreichen Größen, Dynamiken, deren Kopplungen etc. abhängt, lässt sich ein Abbild nur in vereinfachter Form niederschreiben. Demzufolge enthält ein Klimamodell im Kern physikalische Beschreibungen in Form von mathematischen Gleichungen. Dabei hat die Modellierungsforschung in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht. Bereits relativ einfache Modelle in den 1960er Jahren führten zu vergleichsweise guten Ergebnissen. So schätzten Manabe und Wetherald bereits 1967³⁰, dass eine Verdoppelung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre dazu

26 David S. Ellworth et al.: Elevated CO₂ does not increase eucalypt forest productivity on a low-phosphorus soil; *Nature Clim Change* 7, 279–282 (2017). <https://doi.org/10.1038/nclimate3235>.

27 Reich, P., Hobbie, S., Lee, T. et al. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature* 440, 922–925 (2006). <https://doi.org/10.1038/nature04486>.

28 Seite 7 in Argumentationsschrift zum Thema „Argumente gegen den anthropogenen Treibhauseffekt und ihre Widerlegung“ von Prof. Dr. M. Schmitt (Hochauflösende UV-Laserspektroskopie an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf).

http://www.ak-schmitt.hhu.de/fileadmin/redaktion/Fakultaeten/Mathematisch-Naturwissenschaftliche_Fakultaet/Chemie/Phys_Chem1/AK_Schmitt/Argumente_gegen_den_anthropogenen_Treibhauseffekt_und_ihre_Widerlegung.pdf.

Er veranstaltet seit dem vergangenen Jahr eine Ringvorlesung (Klimakrise), in der verschiedene Experten Vorträge halten. Die Materialien (teilweise mit Filmmaterial) sind im Internet abrufbar:

<http://www.ak-schmitt.hhu.de/klimakrise.html>.

29 Ebd.

30 Syukuro Manabe and Richard T. Wetherald: Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity; 1. Mai 1967; [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2).

führe, dass die Temperatur der Atmosphäre (bei festgelegter relativer Luftfeuchtigkeit) um etwa 2° C erhöht werde. Aktuelle Schätzungen liegen zwischen 1,5 °C und 4,5 °C.³¹

Wichtig ist, Klimamodelle von Wettervorhersagen zu unterscheiden: Wettervorhersagen sind detaillierte Abschätzungen, die die meteorologischen Ereignisse der nächsten Tage beschreiben. In die Berechnung gehen Größen der genauen Lagen und Zugrichtung bzw. Zuggeschwindigkeit von Hochdruck-, Tiefdruck- und Regengebieten ein. Vorhersagen, die über die nächsten Tage hinausgehen, sind durch wachsende Unsicherheiten gekennzeichnet. Klimamodelle liefern keine exakten Aussagen, sondern Mittelwerte und Trends für die weitere Zukunft.

Verschiedentlich wurde kritisiert, dass Klimamodelle unzureichend und falsch seien. Da die Prognosen in die Zukunft weisen, ist es nicht möglich, aktuell aufgestellte Modelle ohne weiteres zu verifizieren. Allerdings lassen sie sich auf vergangene Szenarien anwenden. Klimamodelle sind durchaus in der Lage, wichtige Aspekte des vergangenen Klimas und vergangener Klimaänderungen zu reproduzieren. Unsicherheiten bleiben naturgemäß bei jeglicher Anwendung von Modellierungen bestehen. In der Vergangenheit gab es durchaus auch Beispiele, dass aus Modellierungsergebnissen zu konservative Prognosen abgeleitet worden waren. Beispielsweise war in Rahmstorf et al. 2012³² festgestellt worden, dass die Meeresspiegel seit den 1990er Jahren stärker anstiegen als 2001 im 3. IPCC-Sachstandsberichten auf der Basis von Modellrechnungen vorhergesagt worden war (2 mm pro Jahr). Der durchschnittliche Anstieg zwischen 1993 und 2010 betrug laut Satellitenmessungen 3,2 mm pro Jahr.³³

Im aktuellen Weltklimabericht wird eine Erhöhung der durchschnittlichen, globalen Erdoberflächentemperatur um 1,5 bis 4,5 Grad Celsius prognostiziert (mit einer Spannbreite von drei Grad).³⁴ Die Darstellungen sind Resultate aus dem **Zusammenspiel verschiedener Modellierungsansätze, die gemeinsam sinnvolle Aussagen über das zukünftige Klima zulassen**. Die Frage nach der Qualität der derzeit verfügbaren Klimamodelle ist auch Gegenstand des fünften Sachstandsberichts des Weltklimarates aus dem Jahr 2014. Darin heißt es: „Die Modelle geben die beobachteten Muster und Trends [des Klimas] über viele Dekaden der Erdoberflächentemperatur im kontinentalen Maßstab wieder, einschließlich der stärkeren Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts und der unmittelbar auf große Vulkaneruptionen folgenden Abkühlung.“³⁵

31 Aus Simulationen der letzten 150 Jahre zum Nachweis des Zusammenhangs CO₂/Temperatur lässt sich sehr deutlich erkennen, dass die Modelle den tatsächlichen Beobachtungen sehr nahe kommen. Es wurden Simulationen mit und ohne CO₂-Veränderungen berechnet und sodann die tatsächlichen Beobachtungswerte der Erdtemperatur darüber gelegt. Es zeigt sich, dass unter Berücksichtigung der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen und Sulfataerosole die Temperaturanomalitäten sehr genau modelliert werden können. Siehe hierzu Seite 13 in: „Einführung in die Klimamodellierung“; Prof. T. Stocker Physikalisches Institut Universität Bern WS 2002/2003; https://paleodyn.uni-bremen.de/gl/geo_html/lehre/ThomasStockerskript0203.pdf.

32 Quelle: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/4/044035>.

33 Quelle: <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-klimamodelle-sind-nicht-verlaesslich>.

34 Quelle: <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-klimamodelle-sind-nicht-verlaesslich>.

35 Seite viii in: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/IPCC_AR5_WGI_FAQ_deutsch.pdf.

Im Jahr 2018 ist ein Übersichtsartikel in der wissenschaftlichen Zeitschrift *Environmental Research Letters*³⁶ erschienen mit dem Titel: „A fluctuation in surface temperature in historical context: reassessment and retrospective on the evidence“³⁷. Der Artikel widmet sich der Thematik der „angeblichen Erwärmungspause“ der globalen, mittleren Oberflächentemperatur der Erde. Die Wissenschaftler belegen hier, dass es nur wenige oder keine statistischen Belege dafür gibt, dass die globale, mittlere Oberflächentemperatur der Erde entweder keinen oder einen verlangsamten Erwärmungstrend zeige. Die Wahrnehmung, dass es eine solche Verlangsamung gebe, sei bedingt durch Verzerrungen der Daten und nicht vollständig durchgeführter statistischer Tests. In einem weiteren Artikel aus dem Jahr 2018 („The 'pause' in global warming in historical context: (II). Comparing models to observations“) in derselben Zeitschrift wird die Fragestellung erneut aufgegriffen. Die aus dieser Publikation abgeleiteten Erkenntnisse bestätigen die Ergebnisse der ersten Publikation.³⁸

36 Impact Factor 2018: 6,192 (wissenschaftlicher Einflußfaktor).

37 James S Risbey et al 2018 *Environ. Res. Lett.* 13 123008; <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf342>.

38 Stephan Lewandowsky et al.; *Environ. Res. Lett.* 13 (2018) 123007 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf372>.