



Zur öffentlichen Klimadebatte (Arbeitstitel)

Bitte einstweilen nicht nach außen geben. Der Text ist noch in Diskussion und bei einigen Grafiken müssen die Rechte angefragt werden!



1. Vorbemerkung

Die Akademie Solidarische Ökonomie befasst sich mit dem Entwurf einer solidarischen Gesellschaft. Es geht dabei um sozioökonomische Rahmenbedingungen, die ein gutes Leben für alle ermöglichen. Das Fördern gelingender Beziehungen zwischen Menschen sowie zwischen Menschheit und Natur ist unserer Ansicht nach die entscheidende Aufgabe eines Gesellschaftssystems, das uns in die Zukunft zu führen vermag.

Gelingende Beziehungen zwischen Menschheit und Natur setzen einen achtsamen Umgang voraus; wir sind Bestandteil der Natur, nicht ihr Gegenspieler. Und dieser achtsame Umgang umfasst auch Klimaschutzmaßnahmen. Bevor sich jedoch solche Maßnahmen überhaupt bedenken lassen, muss zunächst Klarheit herrschen, was es denn mit dem aktuell beobachteten Klimawandel auf sich hat. Dem geht die vorliegende Schrift nach; sie ist somit eine Art Vorarbeit.

Die Debatte um den Klimawandel und seine Ursachen hat im Laufe der letzten drei Jahrzehnte zu öffentlichen Auseinandersetzungen geführt. Dabei oft verwendete Gruppenbezeichnungen wie „Klimaskeptiker“ oder „Klimabefürworter“ sind nicht ohne Komik. Gemeint ist Skepsis oder Befürwortung gegenüber der These des anthropogen bedingten – also durch Menschen verursachten – Klimawandels (AGW: Anthropogenic Global Warming). Das Pro und Kontra hat in der Öffentlichkeit zu einer Polarisierung geführt, die wir gerne hinter uns lassen wollen. Stattdessen soll es um Argumente gehen. Wir möchten uns also mit den *Zweifeln* befassen, die in der öffentlichen Wahrnehmung noch bestehen – und halten das für dringend nötig. Sofern Sachverhalte mittlerweile klar nachgewiesen sind, werden wir die Zweifel entkräften können. Und wo auf Grund des derzeitigen Wissensstands tatsächlich noch Zweifel bestehen, müssen wir sie wohl einstweilen gelten lassen.

Der Welt-Klima-Rat (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) ist eine Institution der Vereinten Nationen. Hier werden internationale Fachbeiträge zu Fragen des Klimas zusammengetragen. Kritisches Hinterfragen gehört zur wissenschaftlichen Arbeit; das betrifft gleichermaßen die ursprüngliche Erstellung und Begutachtung der Fachpublikationen, ihre spätere Reflexion durch den IPCC und schließlich das wissenschaftliche Echo auf die IPCC-Reports nebst deren öffentlicher Diskussion. Skepsis und Befürwortung sind dabei ganz normale Reaktionen, solange sie verfügbares Wissen nicht abweisen, falls es nicht ins jeweilige Überzeugungsmuster passt. Dieses verfügbare Wissen erscheint auf den ersten Blick wie ein undurchdringlicher Dschungel von Argumenten und Gegenargumenten. Doch man kann sich auch als Nichtfachmann zumindest halbwegs einen Überblick verschaffen, alles ist dokumentiert. Die nachfolgende Zusammenstellung ist der Versuch eines solchen Überblicks.

Die Klima-Problematik ist eingebettet in eine ganze Reihe von Problemen. Niemals zuvor hat die Menschheit die Ökosysteme intensiver genutzt und verändert als in den letzten 50 Jahren. Dem dabei erreichten Wohlstandsgewinn (leider nur eines Teils aller Menschen) steht allerdings eine wachsende Störung dieser Systeme gegenüber. Die Natur stellt uns Nahrung, Wasser, Rohstoffe usw. zur Verfügung (*bereitstellende Dienstleistungen*). Sie baut Schadstoffe ab, reguliert das Klima, stellt den Nährstoff- und Wasserkreislauf sicher – und noch vieles mehr (*regulierende Dienstleistungen*). Für alle diese überaus wertvollen Funktionen – von denen letztlich unser Leben abhängt! – hat sich der Begriff *Ökosystemdienstleistung* eingebürgert. Die UN-Studie Millennium Ecosystem Assessment (MA) hat 24 Ökosystemdienstleistungen

näher untersucht und kommt schon 2005 zu dem Ergebnis, dass sich 15 von ihnen „in einem Zustand fortgeschrittener oder anhaltender Zerstörung“ befinden.¹

Ein Beispiel gestörter Ökosystemdienstleistungen ist das komplexe System des Bodens, welches uns nicht nur landwirtschaftliche Erträge schenkt, sondern zugleich auch totes organisches Material abbaut, die Bodenbildung sicherstellt und den Wasserhaushalt reguliert usw. 1997 waren 15 % der eisfreien Landoberfläche durch Menschen in ihrer Fähigkeit herabgesetzt (sog. Degradation), 2008 waren es bereits 24 %. Die Degradations-Ursachen sind u. a. Erosion, Bodenversalzung oder -verdichtung, Schädigung durch Monokulturen und Schadstoffeintrag. Jährlich verlieren wir ungefähr 24 Milliarden Tonnen an Oberflächenboden.² Dieser Trend ist für uns Menschen – insbes. wegen steigender Anforderungen bei der weltweiten Nahrungsmittelproduktion – offensichtlich ungut.

Ein weiteres Beispiel findet sich bei den Ökosystemdienstleistungen der Meere und Küsten. In europäischen Gewässern sind bereits 88 % der Fischbestände überfischt, weltweit sind es 32 %. Die Sauerstoffkonzentration in den oberen Meeresschichten hat in den vergangenen 50 Jahren um 2 % abgenommen und zugleich ist der pH-Wert der Ozeane gesunken (Versauerung). Immer stärker wird das Meer durch Schadstoffeinträge belastet. Allein die Nitratfracht des Mississippi beträgt jährlich ca. 1 Million Tonnen und die Mikroplastik-Belastung liegt in den pazifischen und atlantischen Wirbeln bereits zwischen 1 und 2,5 kg/km².³ All das und ebenso die Meereserwärmung setzt vor allem Kleinstlebewesen wie das Phytoplankton unter Druck (Sammelbegriff für verschiedene Algen und Cyanobakterien). Diese stehen nicht nur am Anfang der Nahrungskette, sondern sind auch für mindestens 50 % der weltweiten Sauerstoffproduktion zuständig. Das marine Phytoplankton ist gegenüber 1950 bereits um 40 % zurückgegangen!⁴ Auch diese Entwicklung ist für uns Menschen offensichtlich ungut.

Und ein solches Beispiel gestörter Ökosysteme ist eben auch die Klimaregulation: ein Ausschnitt aus der Gesamtproblematik. Das Wort ‚gestört‘ verkörperte dabei unsere Menschensicht. Nüchtern betrachtet geht es nur um Veränderungen, die nicht das Klima stören werden sondern *uns*. Das Klima hat sich während der Erdgeschichte immer wieder verändert; es wird sich auch weiterhin verändern und lässt sich nicht auf Wunschtemperaturen halten. Wir werden jedoch nachfolgend betrachten, in welchem Maße menschliche Aktivitäten zu Klimaveränderungen führen, denn darauf können (und sollten!) wir Einfluss nehmen.

Die nachfolgenden Abschnitte enden jeweils mit einer kurzen Zwischenbilanz (grau/blauer Kasten). Wer sich zunächst nur für die Resultate interessiert und nicht für die zugehörigen Hintergründe, kann jeweils diese Zwischenbilanzen lesen. Im Abschnitt 10 ist dann auf anderthalb Seiten alles noch einmal zusammengefasst.

¹ Deutsche UNESCO-Kommission e.V.: Millennium Ecosystem Assessment [www.unesco.de; 3.10.2013].

² Wikipedia: Bodendegradation [https://de.wikipedia.org/wiki/Bodendegradation; 2.10.2019].

³ Meeresatlas 2017, Heinrich Böll Stiftung Schleswig-Holstein.

⁴ [https://de.wikipedia.org/wiki/Phytoplankton; 20.10.2019].



Sahara

2. Klima

Bisweilen wird die Auffassung vertreten, dass es Klima überhaupt nicht gibt; real existiert nur Wetter. Das ist im Grunde zutreffend: immer nur die tatsächlichen Phänomene sind real. Nun besteht aber das Wesen jedweder Erkenntnis darin, reale Phänomene wahrzunehmen und geistig einzuordnen. Genau in diesem Sinne versteht man unter Klima die statistische Beschreibung des Wetters über eine Zeitspanne an einem bestimmten Ort. Diese Zeitspanne umfasst mindestens 30 Jahre oder auch weit längere Zeiträume. Dabei werden Zustandsgrößen wie bspw. Temperatur und Flussgrößen wie etwa Niederschlag erfasst. Das Klimasystem besteht aus Komponenten (Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, ...), zwischen denen ein stetiger Energieaustausch stattfindet. „Motor“ dieses Austauschs ist die Sonneneinstrahlung.

Im engeren Sinne lässt sich unser Klima als Resultat der Triebkräfte der Atmosphäre verstehen. Insbesondere die Temperatur wird wesentlich durch die Zusammensetzung der Atmosphäre bestimmt. In der Atmosphäre spielt der *Treibhauseffekt* eine wichtige Rolle für die Temperaturentwicklung. Die von der Sonneneinstrahlung erwärmte Erdoberfläche sendet Wärmestrahlung aus. Ohne Treibhauseffekt würden diese auf direktem Wege die Erde verlassen. Dank der Atmosphäre wird aber ein großer Teil davon absorbiert und in alle Richtungen abgestrahlt – auch zurück zur Erdoberfläche, welche nun einschließlich der unteren Luftschichten zusätzlich aufgeheizt wird. Dadurch konnte sich auf der Erde eine lebensfreundliche mittlere Gleichgewichtstemperatur von etwa 15 °C einstellen, die ohne Atmosphäre bei minus 18 °C liegen würde.

Den natürlichen Treibhauseffekt verdanken wir Wolken und *Treibhausgasen*: Sie lassen kurzwellige Strahlung (Sonneneinstrahlung) besser passieren als langwellige (Wärmeabstrahlung). Bereits 1824 hatte J. Fourier den Treibhauseffekt erkannt und schon 1864 nannte J. Tyndall die wichtigsten Treibhausgase. Deren Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt gemäß heutigem Kenntnisstand ist in Tab.1 dargestellt:⁵

Tab.1: Anteil am natürlichen Treibhauseffekt

Wasserdampf:	60 %
CO ₂ :	26 %
Ozon:	7 %
Lachgas:	4 %
Methan:	3 %

Die Gase haben ein unterschiedlich hohes Treibhauspotenzial (z. B. Methan das 25-Fache von CO₂) und sie kommen in unterschiedlicher Konzentration in der Atmosphäre vor. Der Wasserdampf-Anteil liegt bei 2,6 %, alle anderen sind Spurengase; sie werden in ppm (Teile pro Million) oder noch kleineren Einheiten gemessen. –

So ähnlich, wie die menschliche Gesellschaft ohne Kenntnis ihrer Geschichte unverstündlich bliebe, erschließt sich auch das Klima erst durch einen Blick zurück – und da sehen wir fortwährende Veränderung. Es gibt kurzzeitige Klimaschwankungen wie die sogenannte Kleine Eiszeit im 17. Jahrhundert, deren Hintergründe bisher nicht restlos verstanden sind. Schwankungen der Sonnenaktivität sowie Vulkanismus werden als Auslöser vermutet, welche im Zusammenspiel mit der Eigendynamik des Klimas dann letztlich die Veränderungen bewirken. Solche kurzzeitigen Wechsel sind eingebettet in eine Abfolge von Warm- und Eiszeiten

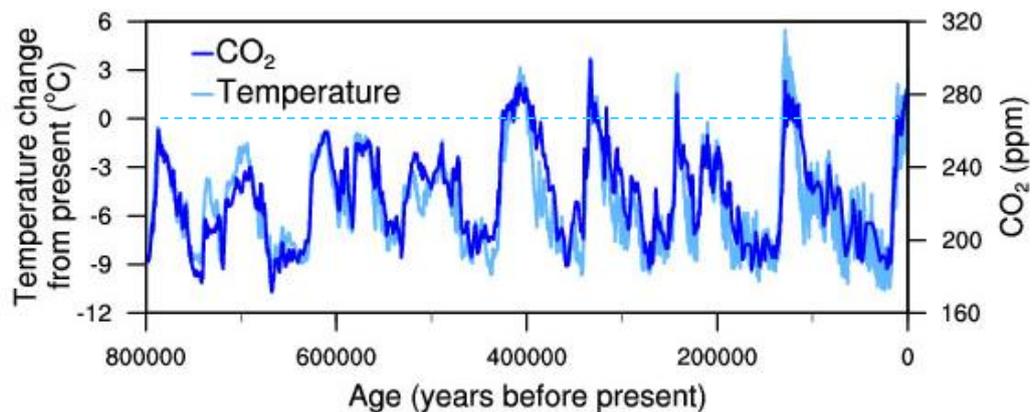
⁵ C. Buchal, C. D. Schönwiese: Klima, Hrsg. Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung 2010, S.78.

längerer Dauer. Seit über 2 Millionen Jahren hat sich ein Rhythmus von rund 90.000 Jahren Kälte und 10.000 Jahren Wärme eingepegelt.

Mit dem Klima der Vergangenheit befasst sich die Paläoklimatologie. Ihre Aussagen gewinnt sie aus indirekten Informationen: aus sog. Klimaarchiven, auch Proxydaten genannt. Dazu gehören bspw. Baumringe, Tropfsteine oder Sediment- und Eisbohrkerne. Im Eis geben Gasbläschen Auskunft über die damalige Zusammensetzung der Atmosphäre, und das Verhältnis von schweren zu leichten Sauerstoff-Isotopen liefert Informationen zur Temperatur. In Polnähe finden wir ein Eisarchiv über hunderttausende Jahre. Dort fallen Temperaturschwankungen jedoch normalerweise höher aus als in anderen Gebieten (sog. polare Verstärkung). Sie können deshalb nicht einfach als *globale* (weltweite) Werte angesehen werden. Will man näherungsweise globale Schätzwerte erhalten, werden polare Temperaturdaten üblicherweise um den Faktor 0,5 korrigiert.⁶

Wir betrachten nachfolgend Eisbohrkerndaten der Ost-Antarktis, Station EPICA Dome C. Abb.1 zeigt hellblau die Temperatur-Abweichungen von den Werten der Gegenwart (= Null-Linie) sowie tiefblau den CO₂-Gehalt der Atmosphäre über 800.000 Jahre:

Abb.1: Temperatur- und CO₂-Veränderungen, gemessen in Eisbohrkernen (Ost-Antarktis)



Quelle: NOAA (2008), ergänzt

Deutlich ist die Abfolge von Kalt- und Warmzeiten zu erkennen und dabei besteht ein unübersehbarer Zusammenhang zwischen Temperatur und dem CO₂-Gehalt der Atmosphäre. Was verursacht eigentlich diese Abfolge? Es gilt als erwiesen, dass periodische Veränderungen der Erdbahngeometrie (Milankovitch-Zyklen) als Auslöser wirken. Allerdings reicht die daraus resultierende Änderung der Sonneneinstrahlung zur Erklärung der Eiszeit/Warmzeit-Wechsel bei weitem nicht aus. Man nimmt deshalb zusätzliche verstärkende Effekte an (sog. positive Rückkopplungen). Viele Wissenschaftler verweisen hierbei auf die CO₂-Schwankungen. Aber warum passieren die CO₂-Schwankungen überhaupt? Und weshalb in dieser Form? In Warmzeiten ist der CO₂-Gehalt der Atmosphäre besonders hoch, aber gerade in dieser Zeit ist das Pflanzenwachstum üppig, und Pflanzen nehmen CO₂ auf. Müsste der CO₂-Gehalt da nicht eigentlich niedriger statt höher sein?

Die Antwort auf diese interessante Frage findet sich wahrscheinlich nicht an Land, sondern unter Wasser. Angesichts der riesigen Menge des im Ozean gebundenen CO₂ (mehr dazu im nächsten Abschnitt) genügen schon geringe Veränderungen im Gasaustausch zwischen Meer und Atmosphäre, um die Schwankungen zu erklären. Untersuchungen an fossilen Einzellern

⁶ Vgl. z. B. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:All_palaeotemps_G2.svg; 19.11.2019].

deuten darauf hin, das während der Eiszeiten infolge nun trockener Winde mehr eisenhaltiger Staub in den südlichen Ozean gelangte und das Wachstum der Meeresalgen angeregt hat. Diese entziehen der Atmosphäre CO_2 , und der organisch gebundene Kohlenstoff sinkt schließlich in die Tiefsee. Zugleich legen Beobachtungen nahe, dass das Ozeanwasser während der Eiszeiten stärker physikalisch geschichtet war. Dadurch stiegen weniger Nährstoffe und CO_2 -reiches Tiefenwasser an die Wasseroberfläche auf, und das Ausgasen von CO_2 nahm ab. Beide Effekte zusammen könnten das Abfallen der atmosphärischen CO_2 -Konzentration während Eiszeiten erklären – und das hatte dann eine Verstärkung des Temperaturabfalls zur Folge.⁷ Der umgekehrte Effekt (weniger Algenaktivität und stärkerer Aufstieg aus der Tiefsee) könnten das Anwachsen der atmosphärischen CO_2 -Konzentration am Beginn einer Warmzeit erklären – und daraus folgt eine Verstärkung der weiteren Erwärmung.

Insgesamt ist vieles noch rätselhaft, z. B. warum sich das Klima in den letzten Jahrtausenden nicht bereits wieder stärker abgekühlt hat, wie es den Erdbahnparametern zufolge eigentlich zu erwarten gewesen wäre.⁸

Zwischenbilanz:

- Unsere Klima ist nicht konstant, wir befinden uns seit über 2 Millionen Jahren in einer Abfolge von Eis- und Warmzeiten. Die aktuelle Epoche ist eine Warmzeit.
- Das Klima auf der Erde hängt von vielen Faktoren ab. Eine wichtige Rolle spielt der natürliche Treibhauseffekt. Er regelt das Verhältnis von Sonneneinstrahlung und Wärmeabstrahlung und wird durch Treibhausgase verursacht.

⁷ A. Martínez-García u. a., 2017: Atmosphärische CO_2 -Veränderungen und quartäre Eiszeiten [www.mpg.de/11782593/mpch_jb_2017; 25.02.2020].

⁸ ZAMG Informationsportal Klimawandel [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/antriebe/astronomische-zyklen; 19.11.2019].



Alpen, Aletschgletscher

3. CO₂ und Kohlenstoffkreislauf

Ein oft zu hörender Einwand lautet, dass die atmosphärische CO₂-Konzentration derart minimal ist (nur 0,041 % der Atmosphäre bestehen aus CO₂), dass sie keine nennenswerte Auswirkung habe und ohnehin im Messfehlerbereich liege. Am Beispiel des „Ozonlochs“ sollte jedoch klar sein, dass aus minimaler Konzentration (Ozon: 10 ppm) nicht auf ‚keine Auswirkung‘ geschlossen werden darf. Und die CO₂-Konzentration lässt sich sehr genau messen, sie wird seit 1958 weltweit in Messstationen ermittelt, z. B. auf der Zugspitze oder Mauna Loa (Hawaii). Wir sehen in den Mauna-Loa-Daten von Abb.2 einen nichtlinearen Anstieg bei jahreszeitlichen Schwankungen auf 415 ppm per 2019; die Pfeile machen die zunehmende Anstiegsgeschwindigkeit deutlich:⁹

Atmosphärische CO₂-Konzentration 1958–2019

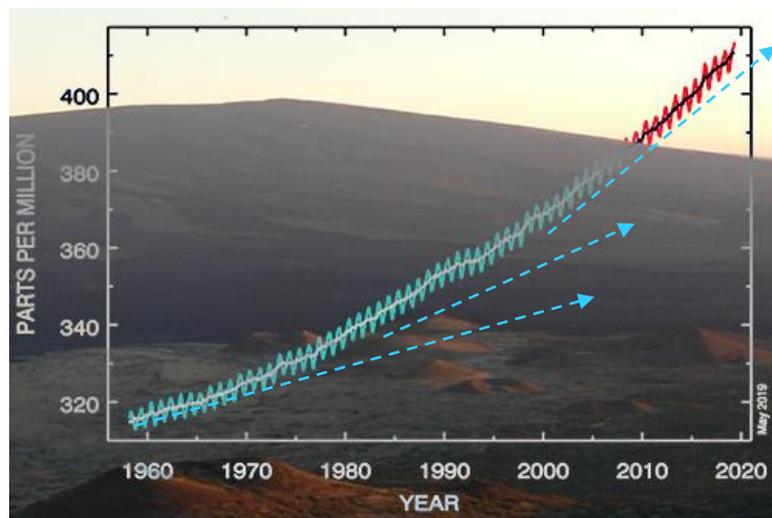


Abb.2

Quelle: Kevstan (2019), ergänzt

1780 lag der CO₂-Anteil noch bei 280, 1965 dann bei 320 ppm. In den 1990er Jahren stieg er bereits um 1,49 ppm pro Jahr, 2015 dann sogar um 3 ppm. Mit den Daten von Abb.2 werden wir jetzt unsere Abb.1 aktualisieren. Dabei erscheint der Anstieg der CO₂-Konzentration als senkrechter Pfeil und gar nicht mehr als Kurve, das liegt an der gestauchten Zeitachse zur Darstellung von 800.000 Jahren. Hier also die Ergänzung mit aktuellen CO₂-Daten als Abb.3:

⁹ Kevstan, 2019. Zitiert aus: [www.scinexx.de/news/geowissen/co2-werte-erreichen-neuen-rekordwert/; 3.10.2019].

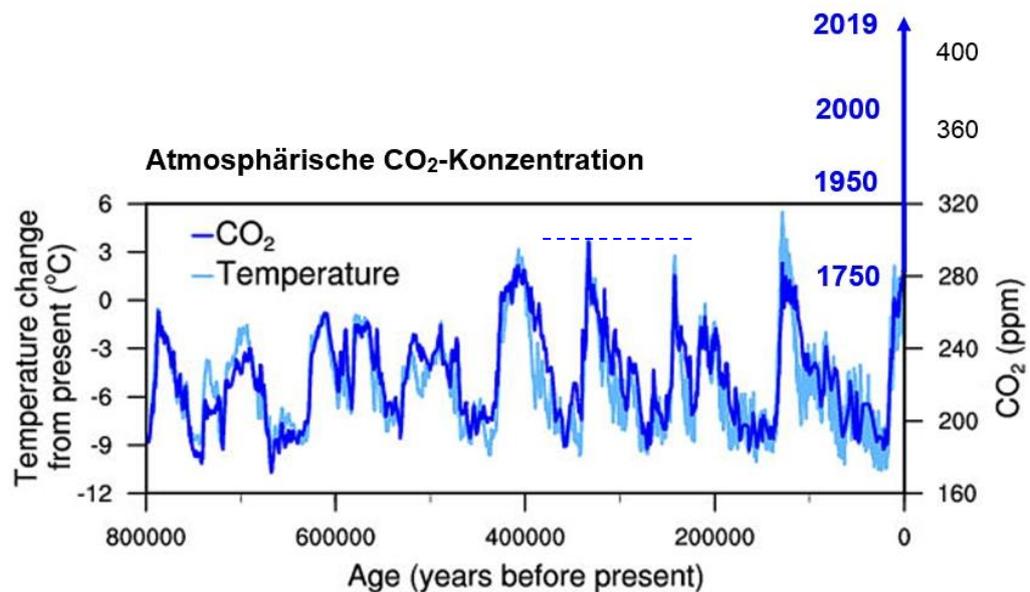


Abb.3

Quelle: NOAA (2008), ergänzt

Die atmosphärische CO₂-Konzentration lag in Warmzeiten nie über 300 ppm (gestrichelte Linie) und sank in Kaltzeiten bis auf 170 ppm. Erst im Industriezeitalter schnellte dann der CO₂-Anteil immer rascher auf Werte hinauf, die es während der letzten 800.000 Jahre nicht ansatzweise gab. Es ist offenbar eine ganz andere Situation entstanden. Eine CO₂-Konzentration in der Größenordnung von 400 ppm findet sich erst 15 Millionen Jahre vor heute. Zu dieser Zeit lag der Meeresspiegel ca. 30 m höher.¹⁰

Wenn also ein derart starker Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration erkennbar ist, dann stellt sich die Frage, ob das an der Industrialisierung liegt. Oft wird argumentiert, dass die von Menschen verursachte CO₂-Emission weit geringer ist als jene der natürlichen Ökosysteme; die Ursache müsse demnach bei Letzteren gesucht werden. Zur Klärung müssen wir den Kohlenstoff-Kreislauf betrachten: den Austausch von Kohlenstoffverbindungen zwischen den einzelnen Sphären der Erde. Die Angabe erfolgt in Gigatonnen Kohlenstoff (GtC) pro Jahr. Und in der Tat gibt die Biosphäre (Boden, Pflanzen, ...) jährlich eine enorme Menge Kohlenstoff ab, es werden Werte um 120 GtC genannt. Weitere rund 90 GtC entfallen auf die Hydrosphäre (Gewässer, Ozeane, ...). Demgegenüber liegt die von Menschen verursachte Kohlenstoff-Abgabe tatsächlich bei nur 5 %. Doch hier lauert ein Trugschluss, denn der enormen Kohlenstoff-Abgabe in Form von CO₂ durch Pflanzen und Gewässer steht deren ebenso enorme CO₂-Aufnahme gegenüber. Dagegen wird die von Menschen verursachte CO₂-Emission zu einem Teil von Pflanzen und Ozeanen mit aufgenommen, zum anderen Teil aber verbleibt sie in der Atmosphäre. Landbiosphäre und Hydrosphäre nehmen also mehr CO₂ auf als sie abgeben (sie sind netto gar keine CO₂-Quellen), während ein Teil der menschengemachten Emission sich fortwährend in der Atmosphäre ansammelt. Man darf demnach nicht allein die CO₂-Abgabe der einzelnen Sphären betrachten, sondern es ist entscheidend, worauf der *tatsächliche Nettozuwachs* zurückgeht. Abb.4 zeigt das in einer schematischen Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs:¹¹

¹⁰ A. Tripathi, 2009. Zitiert aus: [www.scinexx.de/news/geowissen/co2-zuletzt-vor-15-millionen-jahren-so-hoch-wie-heute/; 27.10.2019].

¹¹ [https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffzyklus; 27.10.2019].

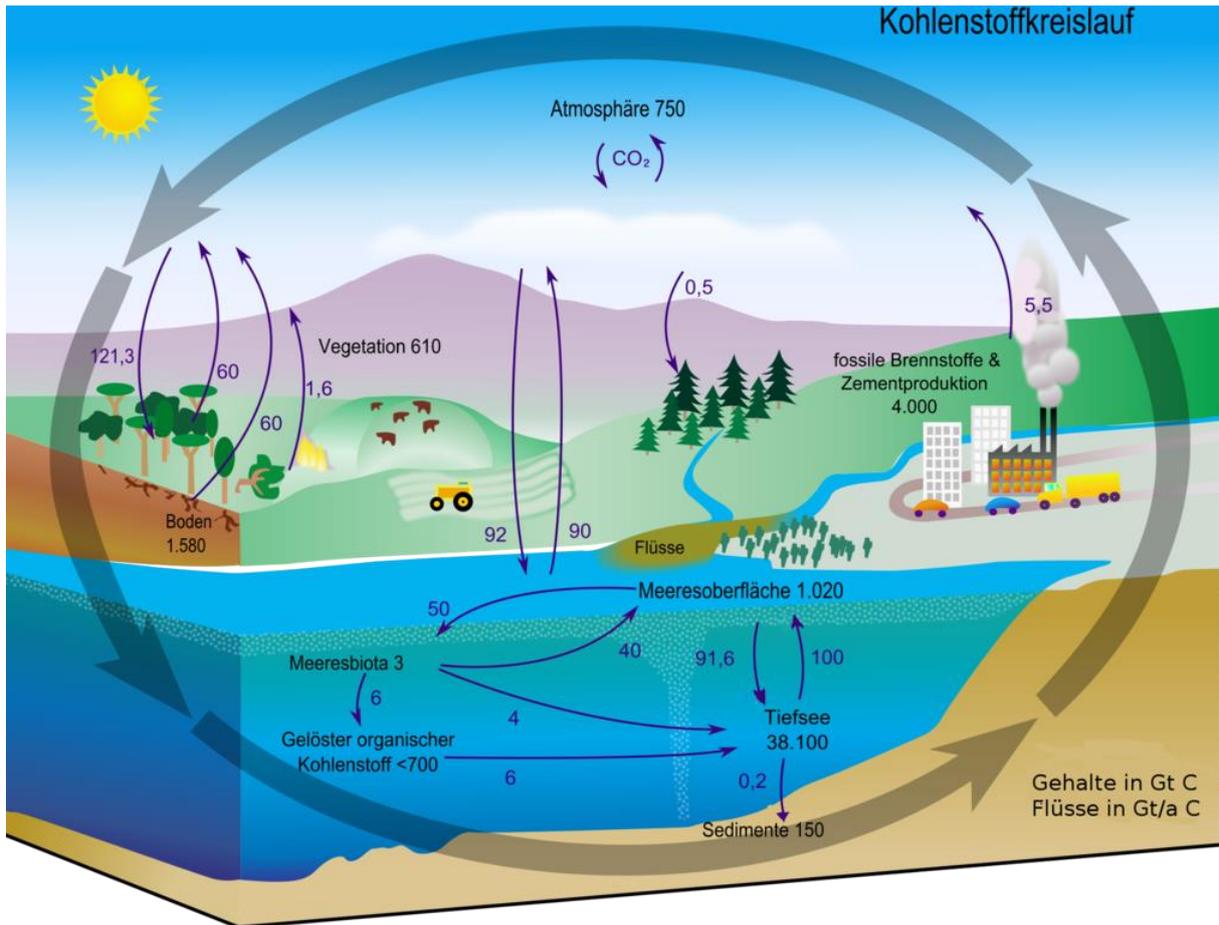


Abb.4 Carbon cycle-cute diagram-german (2011)

Der jährliche Kohlenstoffumsatz der Landbiosphäre liegt in dieser Darstellung bei 121,6 GtC Abgabe und 121,8 Aufnahme, der der Ozeane bei 90 GtC Abgabe und 92 GtC Aufnahme pro Jahr. Netto nehmen beide Sphären jährlich 2,2 GtC mehr auf, als sie abgeben. Die Grafik zeigt rechts einen zusätzlichen Eintrag von 5,5 GtC durch Menschen, dadurch wächst der CO₂-Anteil in der Atmosphäre.

In vorindustrieller Zeit nahmen Pflanze und Ozeane aus der Luft etwa so viel Kohlenstoff auf, wie sie wieder abgaben. Aktuell aber wird durch fossile Brennstoffe Kohlenstoff in den heutigen Kreislauf eingebracht, der seit Jahrtausenden außerhalb „geparkt“ war. Damit wird das heutige Gleichgewicht verändert. Seit Beginn der Industrialisierung fließen große Mengen zusätzlich in den Kohlenstoffkreislauf, dazu folgende Abschätzung:¹²

Geförderter Kohlenstoff von 1850 bis 2010

Kohle:	180 GtC	
Erdöl:	130 GtC	
Erdgas:	18 GtC	
Brandrodung	ca. 200 GtC	Summe ca. 528 GtC

Tab.2

Tatsächlich hat die atmosphärische CO₂-Konzentration von 1850 bis 2010 um 107 ppm zugenommen, das entspricht 234 GtC. Die Differenz von 294 GtC zur Summe von Tab.2 ist in die Landbiosphäre und Hydrosphäre übergegangen.

¹² C. Buchal, C. D. Schönwiese: Klima, Hrsg. Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung 2010, S.78.

Zu Recht wird darauf verwiesen, dass das Gesamtsystem des Kohlenstoffkreislaufs bisher nicht vollständig erforscht ist, dementsprechend variieren z. T. auch die angegebenen Zahlen. Manche Autoren sehen die vulkanische CO₂-Freisetzung in Höhe der fossilen oder „möglicherweise sogar um 100 % darüber“ und bringen noch weitere natürliche CO₂-Quellen ins Spiel: „Insekten atmen jährlich zwischen 60 und 90 Mrd. t. C aus, was einem Anstieg von 30 bzw. 45 ppm entsprechen würde, und Mikroben sind mit 85 und 100 Mrd. t C bzw. 43-50 ppm sogar noch ein wenig fleißiger“.¹³ Die hohen Annahmen zur vulkanischen Emission sind jedoch nicht belegbar und alle Atmung gehört zum Kreislauf der Biosphäre, diese verursacht gar keinen Netto-Zuwachs (s.o.). Vor allem aber: *Wenn natürliche CO₂-Quellen den derzeit sprunghaften Anstieg der atmosphärische CO₂-Konzentration erklären sollen – wie ließe sich dann verstehen, dass sie das in den zurückliegenden 800.000 Jahren nie getan haben?* Vulkane rumorten in allen Epochen, Insekten atmeten und Pflanzen verfaulten immer schon. Doch all das hat nicht zu so hohen CO₂-Werten wie heute geführt!

Während die Stoff-Flüsse im Kohlenstoffkreislauf wie erwähnt in Kohlenstoff dargestellt werden (GtC), wird die anthropogene Emission in Gt CO₂ gemessen (1 GtC sind umgerechnet 3,67 Gt CO₂). Die fossilen Emissionsmengen sehen wir in Abb.5.¹⁴ Wenn man den Ausstoß Jahr für Jahr zusammenzählt (1990: 22, ..., 2010: 33, ..., 2018: 37 Gt CO₂), dann versteht man den unablässigen Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration in Abb.2.

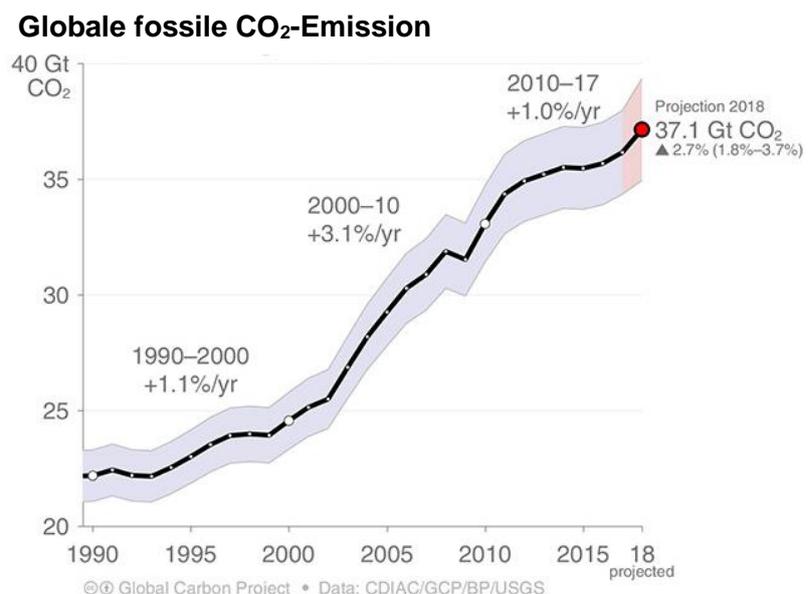


Abb.5

Quelle: Global Carbon Project (2019)

Deutlich ist der Einbruch nach der Finanzkrise zu sehen. Die Stabilisierung der jährlichen Emissionsmenge nach 2014 wurde bereits als Trendwende gefeiert, doch dann stiegen die Werte erneut. Nicht nur die Steigerung der Emission ist ein Problem. Auch kleinere Werte wie die von 1990 haben damals bereits zum Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration geführt (vgl. Abb.2).

Die Emissionsdaten lassen sich nicht einfach messen wie die atmosphärische CO₂-Konzentration. Sie werden von 44 Industrieländern ermittelt und an das Sekretariat der UN-Klimarahmenkonvention berichtet. In Deutschland geschieht das durch das Fachgebiet

¹³ F. F. Mueller, 2013. Zitiert aus: [www.eike-klima-energie.eu/2013/08/25/wer-hat-macht-ueber-das-klima-die-verschwiegenen-co2-quellen/; 27.10.2019].

¹⁴ Global Carbon Project, 2019. Zitiert aus: [www.scinexx.de/news/geowissen/co2-ausstoss-steigt-ungebremst/; 3.10.2019].

Emissionssituation beim Umweltbundesamt. Alle Aktivitäten, welche Emissionen verursachen – vom Kraftwerksbetrieb über den Verkehr bis zur Land- und Abfallwirtschaft –, werden dabei statistisch erfasst.¹⁵ Wer der Ermittlung der Emissions-Daten misstraut, muss erklären, woher sonst – wenn nicht hauptsächlich von fossiler Emission – die stetig wachsende atmosphärische CO₂-Menge stammt. Unser heutiges Verständnis des Kohlenstoffkreislaufs lässt keinen anderen Schluss zu, als dass ein Zusammenhang besteht zwischen dem seit 60 Jahren gemessenen Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration und der fortwährend steigenden anthropogenen CO₂-Emission. Es ist keine andere Quelle erkennbar, die den sprunghaften Anstieg der letzten Jahrzehnte erklären kann.

Wenn wir somit diesen Anstieg als überwiegend durch Menschen verursacht erkennen, lautet der nächste Einwand: Das sei ja aber gar nicht schlimm, die Pflanzen werden das überschüssige CO₂ über kurz oder lang aufnehmen, unser Planet wird davon grüner werden. Tatsächlich berichtet die NASA, der Planet sei bereits jetzt schon grüner geworden.¹⁶ Dabei spielen wohl aber vor allem die Folgen der Erderwärmung eine Rolle. Die tatsächliche Netto-Aufnahme von CO₂ durch Pflanzenwachstum umfasst nicht einmal ein Drittel der Emissionen, dazu Abb.6:¹⁷

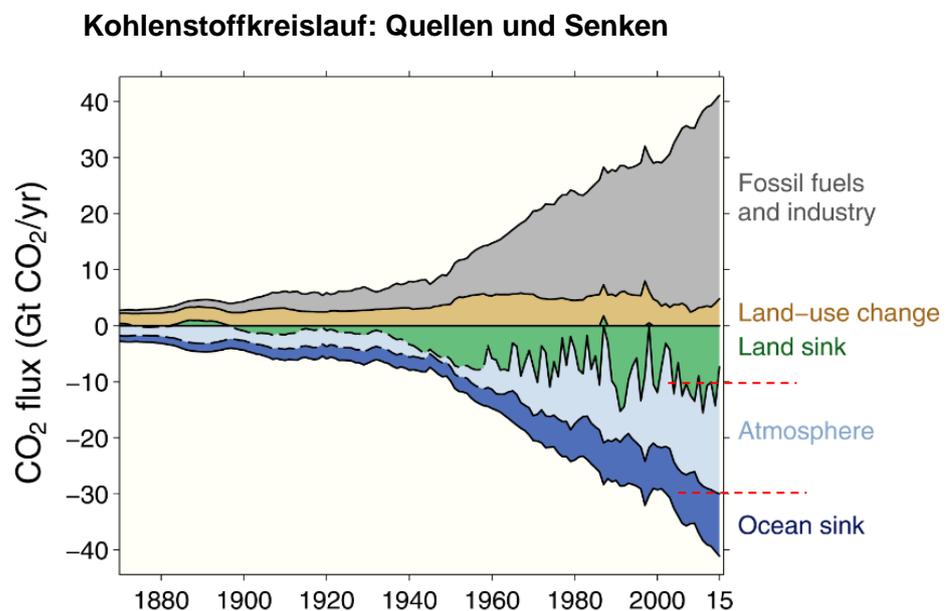


Abb.6

Quelle: Joos et al, Khatiwala et al (2013)

Im oberen Bereich der Grafik sehen wir das Verhältnis von CO₂-Emission durch Landnutzung (braun) sowie Industrie und fossil (grau) in Jahreswerten. Im unteren Bereich ist dargestellt, wohin das emittierte CO₂ wandert. Während von 1940 bis 1955 eine Zunahme des durch Pflanzen gebundenen CO₂ erkennbar ist, setzt sich dieser Trend später nur schwach fort. Vielmehr schwankt der CO₂-Anteil, der von den Landökosystemen aufgenommen wird – je nachdem, ob es Dürren oder gute Wachstumsjahre gab.

¹⁵ M. Strogies, 2016. Zitiert aus: [www.welt-sichten.org/artikel/32477/wie-berechnet-man-co2-emissionen; 20.10.2019].

¹⁶ C. Schrader, 2019. Zitiert aus: [www.spektrum.de/wissen/die-gaengigsten-mythen-zum-klimawandel/1674472; 3.10.2019].

¹⁷ Data: CDIAC; NOAA-ESRL/GCP; Houghton u. a. 2012; Giglio u. a. 2013; Joos u. a. 2013; Khatiwala u. a. 2013; Le Quéré u. a. 2014; Global Carbon Budget 2014. Zitiert aus: [www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2014/GCP_budget_2014_lowres_v1.02.pdf; 27.10.2019].

Wie Abb.6 zeigt, kommt zur fossilen und Industrie-Emission noch die durch Landnutzungsveränderung hinzu (z. B. Entwaldung), sie liegt 2015–17 bei jährlich 4,9 Gt CO₂.¹⁸ Dabei gelangt gerodetes Holz in verhältnismäßig kurzer Zeit wieder in den Kohlenstoffkreislauf zurück, im Falle von Brandrodung sofort.

Die gesamte anthropogene CO₂-Emission (fossil, Industrie und Landnutzungsveränderung) wird für 2018 mit 41,6 Gt CO₂ angegeben.¹⁹ Die jeweiligen Jahresmengen werden derzeit zu rund 28 % von der Biosphäre, zu 27 % von den Ozeanen und zu 45 % von der Atmosphäre aufgenommen.²⁰ Knapp die Hälfte landet also in der Atmosphäre – und genau das belegen ja auch die Messdaten von Abb.2.

Zwischenbilanz:

- Der CO₂-Anteil in der Atmosphäre wächst nichtlinear und in einem seit 800.000 Jahren nie dagewesenem Ausmaß.
- Auch die von Menschen verursachte CO₂-Emission wächst fortwährend und im Kohlenstoffkreislauf ist keine andere Quelle für den sprunghaft steigenden atmosphärischen CO₂-Anteil erkennbar als diese.
- Das zusätzliche CO₂ wird teils von Pflanzen aufgenommen und teils vom Wasser, knapp die Hälfte aber wird in der Atmosphäre angesammelt.

¹⁸ D. Gibbs u. a, 2018: By the Numbers: The Value of Tropical Forests in the Climate Change Equation, 2018. [www.wri.org/blog/2018/10/numbers-value-tropical-forests-climate-change-equation; 30.11.2019].

¹⁹ Zitiert aus: [www.scinexx.de/news/geowissen/co2-ausstoss-steigt-ungebremst/; 2.12.2019].

²⁰ Meeresatlas 2017, Heinrich Böll Stiftung Schleswig-Holstein.



Kamtschatka

4. Weitere Treibhausgase

Mitunter wird der Vorwurf erhoben, die Argumentation der Klimawissenschaft sei auf CO₂ fokussiert und Wasserdampf würde in den Betrachtungen vernachlässigt. Das ist nicht zutreffend; die Rolle von Wasserdampf als dem wichtigsten Treibhausgas ist völlig unstrittig (vgl. Tab.1). Will man jedoch den *durch Menschen verursachten* Anteil der Treibhausgase in der Atmosphäre untersuchen, spielt Wasserdampf tatsächlich keine Rolle – obwohl die Industrie fortwährend Wasserdampf ausstößt. Denn die Atmosphäre nimmt in Abhängigkeit von ihrer Temperatur nur eine bestimmte Menge Wasserdampf auf und ist danach gesättigt. Anders ist es bei CO₂ und den weiteren Spurengasen.

Seit Beginn der Industrialisierung bis in die Gegenwart stieg nicht nur der CO₂-Gehalt der Atmosphäre. Auch Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) gewinnen an Bedeutung. Ihr Anteil wird in parts per billion gemessen: ppb. Sie sind also in noch geringerer Konzentration als CO₂ vorhanden, haben zugleich aber ein deutlich höheres Treibhauspotenzial.

Als wichtigste Ursache der Lachgas-Zunahme gilt die verstärkte Düngung landwirtschaftlicher Flächen. „Industrielle Quellen für N₂O sind die Nylon-Produktion, die Salpetersäure-Produktion und die Verbrennung fossiler Rohstoffe“. ²¹ Abb.7 zeigt die Entwicklung des Lachgas-Anteils: ²²

Entwicklung der atmosphärischen Lachgaskonzentration (ppb, seit der Zeitenwende)

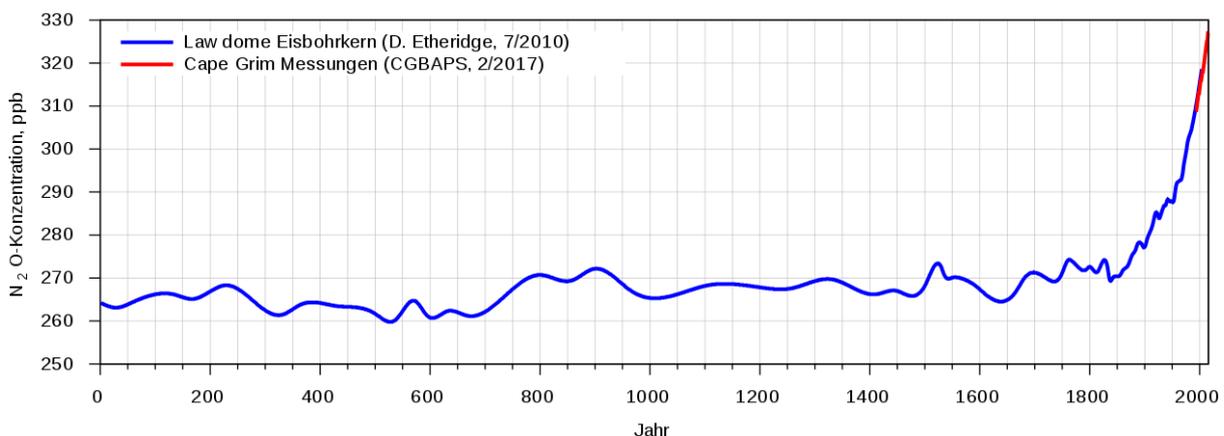


Abb.7

Quelle: NOAA, Deutsche Wikipedia (2017)

Ebenso steigt die Methan-Konzentration stark an. Die heutigen Quellen werden sowohl natürlicher (Fäulnis) als auch anthropogener Emission (z. B. Reisanbau, Massentierhaltung) zugeschrieben. Proxy-Daten seit 640.000 Jahren zeigen die Methankonzentration der Atmosphäre durchweg bei ca. 400 ppb in Kaltzeiten und ca. 700 ppb in Warmzeiten. Die aktuellen Werte von 1.860 ppb per 2017 ²³ sind in dieser Zeitspanne beispiellos, Abb.8 stellt die Entwicklung der letzten 11.000 Jahre dar: ²⁴

²¹ [<https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Lachgas>; 28.10.2019].

²² Datei Ghgs-lawdome-2000yr-N2O-asof2010-de.svg, 2017. Zitiert aus: [<https://de.wikipedia.org/wiki/Distickstoffmonoxid>; 28.10.2019].

²³ [<https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Methan>; 28.10.2019].

²⁴ Datei <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=74565746>, 2018. Zitiert aus: [<https://de.wikipedia.org/wiki/Holozän>; 28.10.2019].

Entwicklung der atmosphärischen Methankonzentration (ppb, seit 11000 Jahren)

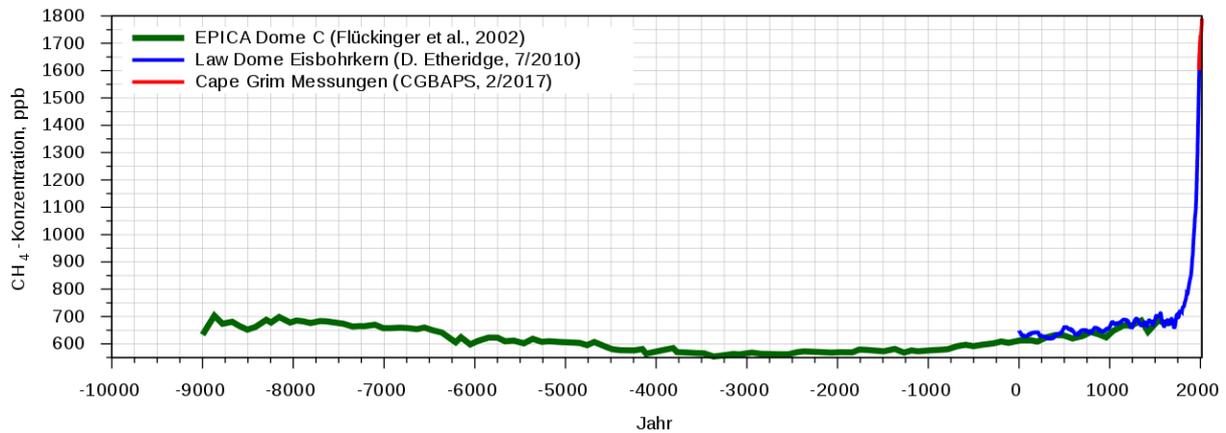


Abb.8

Quelle: Deutsche Wikipedia (2018)

Land- und Forstwirtschaft sowie sonstige Landnutzung machten 2007–2016 weltweit rund 13 % der CO₂-, 44 % der Methan- und 81 % der Lachgas-Emission aus. Das entspricht 23 % der gesamten anthropogenen Treibhausgasemission.²⁵

Auch der Anteil von F-Gasen (fluorierte Treibhausgase) ist zunehmend. Abb.9 zeigt die anthropogene Emission aller Gase, die einen Beitrag zum Treibhauseffekt leisten:²⁶

Jährliche anthropogene Treibhausgas-Emission nach Gruppen von Gasen 1970–2010

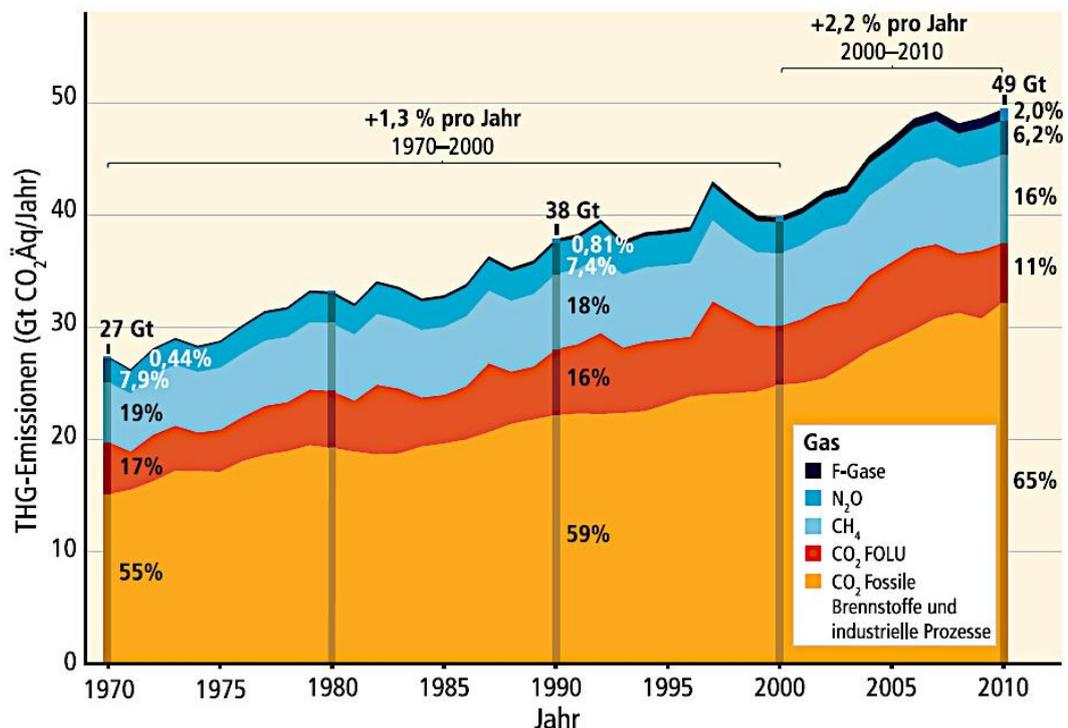


Abb.9

Quelle: IPCC (2014)

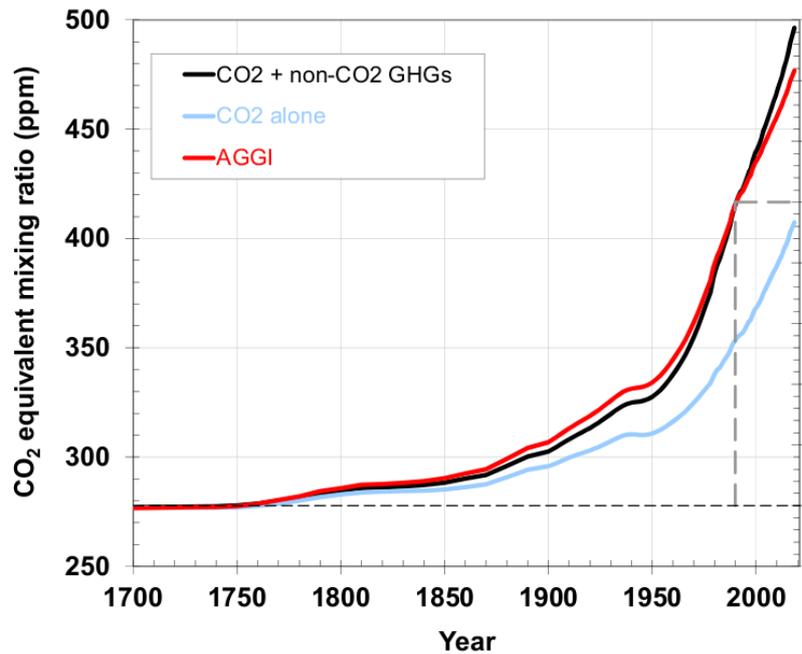
F-Gase: fluorierte Gase, N₂O: Lachgas, CH₄: Methan, CO₂ FOLU: CO₂-Emission aus Forstwirtschaft und anderer Landnutzung

²⁵ IPCC-Sonderbericht „Klimawandel und Landsysteme“ 2019 [www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen_SRCCL.pdf; 3.12.2019].

²⁶ IPCC Synthesebericht „Klimaänderung 2014“, S.46.

Alle diese Treibhausgase werden *infrarotaktive Spurengase* genannt, da sie die infrarote Wärmeabstrahlung der Erde vermindern (Treibhauseffekt). Rechnet man sie über ihr Treibhauspotenzial in CO₂-Äquivalente um, ergibt sich per 2018 ein Gesamtergebnis, dem eine CO₂-Konzentration von 496 ppm entspricht!²⁷ In Abb.10 sehen wir die enorme Entwicklung:

Abb.10: Entwicklung der Treibhausgas-Konzentration in CO₂-Äquivalenten 1700–2018



Quelle: NOAA (2019), Ausschnitt

schwarz: alle Treibhausgase, hellblau: einzig CO₂, rot: AGGI-Index auf Basis 1990 (hier ohne Belang).

Die gesamten Treibhausgasemissionen sind innerhalb der letzten Dekade um 1,5 % pro Jahr gestiegen und erreichten 2018 den Rekordwert von 55,3 Gt CO₂-Äquivalenten.²⁸

Zwischenbilanz:

- Die atmosphärische Konzentration anderer infrarotaktiver Spurengase steigt noch stärker als die von CO₂ – in einem seit 650.000 Jahren nie dagewesenen Ausmaß.
- In CO₂-Äquivalente umgerechnet erreicht der Treibhausgas-Anteil 2019 bereits die 500-ppm-Marke.

²⁷ NOAA 2019 [www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/; 6.12.2019].

²⁸ [www.heise.de/tp/features/Emissionen-weltweit-auf-Rekordhoch-4596516.htmlwww.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/; 16.02.2020].



Kenia, Savanne

5. Globale Erwärmung

Die Bildung mittlerer Globaltemperaturen wird bisweilen als Kunstprodukt kritisiert, das die Realität nur unzureichend wiedergibt. Und tatsächlich erscheint die Aussagekraft eines Mittelwerts im Alltagsgebrauch begrenzt (man denke an den besonders kalten Januar 2010 trotz steigender Durchschnittstemperaturen). Mittelwerte stellen immer ein Kunstprodukt dar, das sich per Definition von den realen Einzelwerten entfernt – und gerade deshalb aber sind sie unverzichtbar: Mittelwerte ermöglichen *Aussagen zu zentralen Tendenzen* innerhalb eines Zeitraums.

Betrachten wir als Zeitraum das Holozän: die Warmzeit in der wir leben. Abb.11 zeigt die Temperaturabweichungen vom Mittelwert des letzten Jahrtausends (= Null-Linie) anhand nordgrönländischer Eisbohrkern-Daten:²⁹

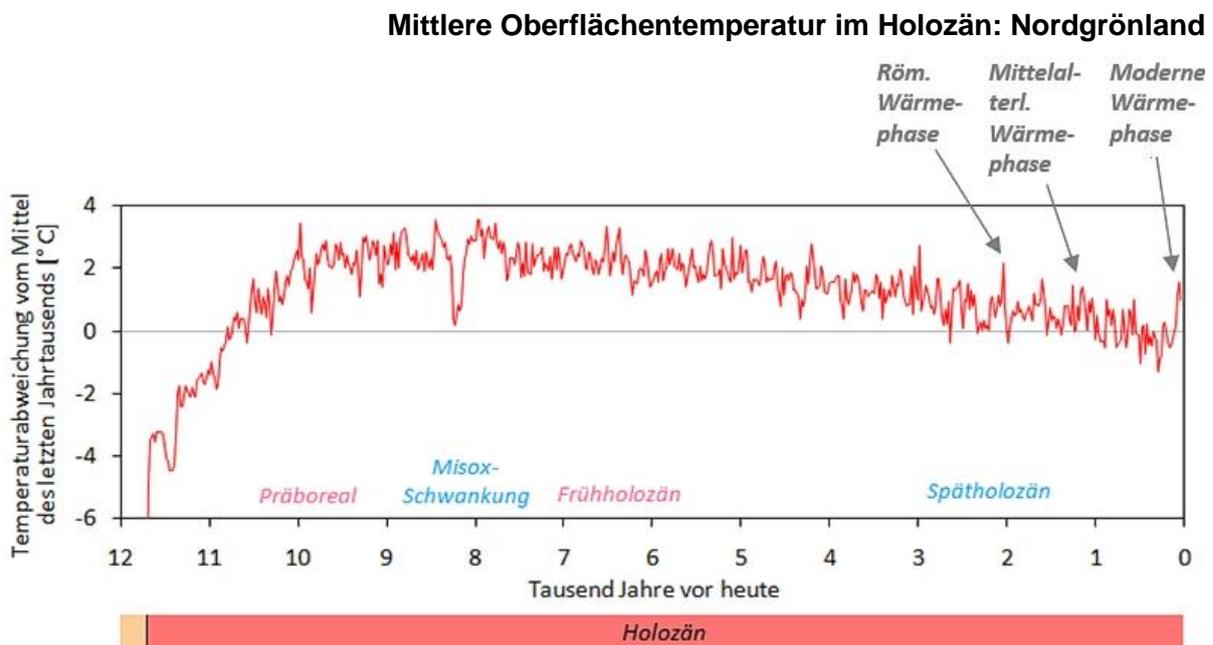


Abb.11

Quelle: ZAMG, ergänzt

Die gezeigten Temperaturabweichungen betreffen Nordgrönland, es sind also keine globalen Werte. Man sieht abrupte Temperaturschwankungen von 2 °C und mehr. In Teilen der Nordhemisphäre verlief die Temperaturentwicklung in etwa analog, anderswo aber stark abweichend.³⁰ In Abb.12 sind die Unterschiede anhand von 8 lokalen Datenreihen aus verschiedenen Erdteilen dargestellt:³¹

²⁹ ZAMG Informationsportal Klimawandel [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/palaeoklima/12.000-jahre; 19.11.2019].

³⁰ G. Lohmann u. a., 2013: A model-data comparison of the Holocene global sea surface temperature evolution [www.clim-past.net/9/1807/2013/cp-9-1807-2013.pdf; 3.11.2019].

³¹ Datei https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Holocene_Temperature_Variations_German.png, 2016. Zitiert aus: [https://de.wikipedia.org/wiki/Klimageschichte#Die_aktuelle_Warmzeit; 3.11.2019].

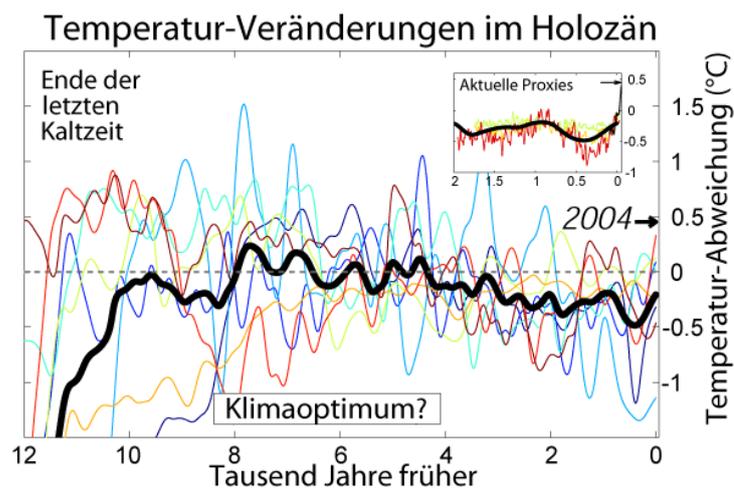


Abb.12

Quelle: R. A. Rohde (2016)

Die schwarze Mittelwert-Kurve darf nicht als globaler Mittelwert interpretiert werden (zu wenig Datenreihen). Deutlich sind die unterschiedlichen Verläufe der lokalen Datenreihen zu sehen.

Betrachten wir nun als Zeitraum das Industriezeitalter. Es ist eine eindeutige Erwärmungsphase festzustellen („moderne Erwärmung“), und die ist nicht mehr indirekt durch Proxy-Daten sondern direkt durch Messungen belegt. Die globale Temperaturabweichung auf der Erdoberfläche relativ zum Mittelwert 1951–1980 beträgt 0,9 °C wie in Abb.13 zu sehen:³²

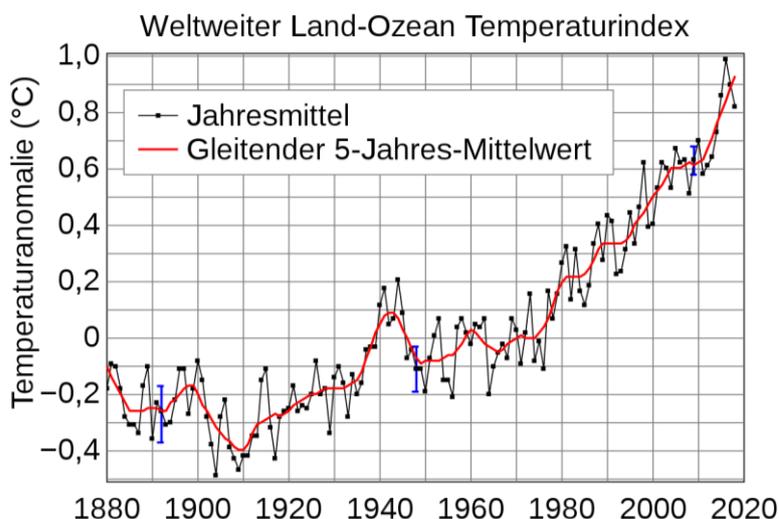


Abb.13

Quelle: NASA (2018)

Die Stabilisierung zwischen 1940 und 1975 wird auf die industrielle Emission von Aerosolen zurückgeführt (hauptsächlich Sulfat aus der Verbrennung von Kohle und Erdöl), welche die Sonneneinstrahlung abschirmen und so die Erwärmung dämpfen. Mit den Maßnahmen zur Luftreinhaltung bei weiter wachsendem Treibhausgasausstoß trat dann dieser Effekt zurück.³³

³² NASA Goddard Institute for Space Studies. Datei https://de.wikipedia.org/wiki/Klimageschichte#/media/Datei:Global_Temperature_Anomaly.svg, 2018. Zitiert aus: [<https://de.wikipedia.org/wiki/Klimageschichte/>; 3.10.2019].

³³ ZAMG Informationsportal Klimawandel [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/lufttemperatur; 19.11.2019].

Wie ordnet sich der aktuelle Temperaturanstieg innerhalb des Holozän ein? Die globale Erwärmung hat bereits Mitte des 20. Jahrhunderts die Werte der mittelalterlichen Wärmephase erreicht und ist jetzt im Begriff, diese zu übertreffen – wenn auch noch unterhalb der Werte des Frühholozän.³⁴ Nach J. Hansen überschritt die Durchschnittstemperatur des erste Jahrzehnts im 21. Jahrhundert den holozänen Mittelwert knapp ($0,25 \pm 0,25 \text{ } ^\circ\text{C}$);³⁵ auch in dieser Einschätzung sind die höheren Werte des Frühholozän wahrscheinlich noch nicht erreicht. Und der IPCC formuliert: „In der Nordhemisphäre war 1983–2012 *wahrscheinlich* die wärmste 30-Jahr-Periode der letzten 1400 Jahre“.³⁶ Zu den genauen Temperaturen gibt es allerdings strittige Ergebnisse: „Dass es in der Größenordnung der langfristigen, vorindustriellen Temperaturschwankung gehörige Unterschiede gibt, die zwischen 0,3 und gut 1°C liegen, weist darauf hin, dass noch genug Forschungsbedarf vorhanden ist“.³⁷

Zum aktuellen Temperaturanstieg bestehen allerdings wesentliche Warnzeichen. Neben der starken Anstiegsgeschwindigkeit von $0,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ in nur 50 Jahren betrifft das vor allem das globale Erscheinungsbild. Die Temperaturschwankungen der letzten 2.000 Jahre waren stets *regional begrenzt* – insbesondere auch die römische und mittelalterliche Wärmephase; eine umfangreiche Daten-Auswertung ergab keinerlei Hinweise auf weltweit kohärente Kälte- und Wärmephasen in diesem Zeitraum.³⁸ Die moderne Erwärmung dagegen betrifft bis auf wenige Ausnahmen *alle Erdteile und erfolgt also global*, dazu Abb.14:³⁹

Veränderungen der mittleren Oberflächentemperatur 1901-2012 in $^\circ\text{C}$

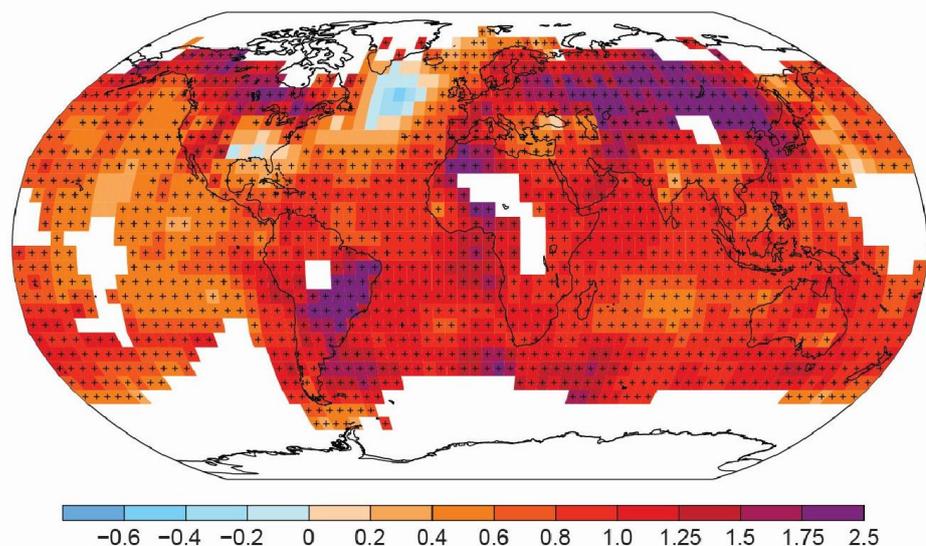


Abb.14

Quelle: IPCC (2013)

³⁴ ZAMG Informationsportal Klimawandel [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/palaeoklima/2.000-jahre; 19.11.2019].

³⁵ J. Hansen u. a., 2013: Climate sensitivity, sea level and atmospheric carbon dioxide [https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0294; 18.12.2019].

³⁶ IPCC, Klimaänderung 2013, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, S.3.

³⁷ ZAMG Informationsportal Klimawandel [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/palaeoklima/2.000-jahre; 19.11.2019].

³⁸ R. Neukom u. a., 2019: No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era [www.nature.com/articles/s41586-019-1401-2; 25.11.2019].

³⁹ IPCC, Klimaänderung 2013, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, S.4.

In nur ganz wenigen Feldern blieb die Temperatur gleich oder sank; in allen mit + markierten Feldern stieg sie an – häufig im Bereich von 1,5 °C oder darüber. In weiß belassenen Gebieten sind nicht ausreichend Messwerte für eine gesicherte Trendangabe in diesem Raster vorhanden.

Abb.14 widerspricht dem Einwand, die Temperatur-Messwerte würden überwiegend aus urbanen Zentren stammen und wegen des Wärmeinsel-Effekts der Städte eine globale Erwärmung nur vortäuschen. Besonders stark von der aktuellen Erwärmung betroffen sind die hohen Breiten der Nordhalbkugel (in Abb.14 nicht belegt): Die Arktis hat sich in den letzten Jahrzehnten mehr als doppelt so stark erwärmt wie der Rest der Erde. Waren in den 1980er Jahren noch über 7 Millionen km² der Arktis im Sommer von Meereis bedeckt, so lag die minimale Ausdehnung in den vergangenen 10 Jahren überwiegend unter 5 Millionen km².⁴⁰

Von regionalen Ausnahmen abgesehen hat sich auch die Meeresoberfläche erwärmt (vgl. Abb.14). Die mittlere globale Erwärmung zwischen 1900 und 2008 wird mit 0,62 °C angegeben.⁴¹ „Global gesehen ist die Erwärmung des Ozeans in der Nähe der Oberfläche am größten. Die obersten 75 m sind im Zeitraum von 1971 bis 2010 um 0.11 [0.09 bis 0.13] °C pro Jahrzehnt wärmer geworden“.⁴² Die Ozeane nehmen mit über 90 % den Löwenanteil der globalen Erwärmung auf, das zeigt Abb.15:⁴³

Energieakkumulation innerhalb des Klimasystems der Erde

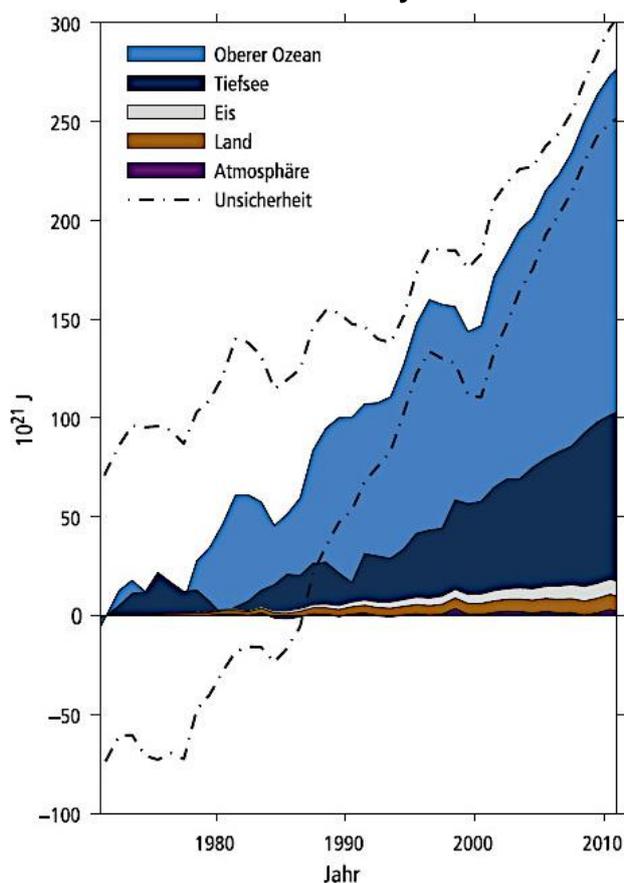


Abb.15

Quelle: IPCC (2014)

⁴⁰ AWI 2017 [www.awi.de/nc/ueber-uns/service/presse/pressemeldung/wie-wirkt-sich-der-klimawandel-auf-die-bewohner-der-arktis-aus.html; 10.11.2019].

⁴¹ Meeresatlas 2017, Heinrich Böll Stiftung Schleswig-Holstein.

⁴² IPCC, Bericht Klimaänderung 2013, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, S.6.

⁴³ IPCC, Synthesebericht „Klimaänderung 2014“, S.42.

Oberer Ozean: oberhalb von 700 m; tiefer Ozean: unterhalb von 700 m,
ab 1992 einschließlich Schätzungen für unterhalb von 2000 m.

Die globale Erwärmung steht im Mittelpunkt öffentlicher Kontroversen. So hat die vorübergehende Stabilisierung zwischen 1998 und 2012 zu einer Reihe von Einwänden geführt: „Wo bleibt die Erderwärmung?“⁴⁴ Nach 2013 stieg der Temperaturindex jedoch wieder. Bisweilen wird die Erwärmung auch überdramatisiert, z. B.: „Temperaturen steigen 40-mal schneller als nach letzter Eiszeit“.⁴⁵ Gemeint ist die globale Durchschnittstemperatur – und die lag am Eiszeit-Maximum vor 20.000 Jahren tatsächlich um etwa 5 °C niedriger als vor 10.000 Jahren im Holozän (rein rechnerisch also 0,005 Grad Erwärmung pro Jahrzehnt). Doch zeigen Proxydaten innerhalb dieses Zeitraums abrupte Schwankungen in kürzester Zeit,⁴⁶ die sicherlich Einfluss auf die globale Temperaturentwicklung hatten; sie verlief wohl kaum stetig in 0,005-Grad-Schritten pro Jahrzehnt. Gleichwohl – und wenn auch nicht 40-mal schneller als damals – ist die aktuelle Geschwindigkeit der *globalen* Temperaturentwicklung im Holozän ohne Beispiel: etwa so abrupt wie die *lokalen* Anstiege in Abb.11.

Obwohl die bisherige Erwärmung wahrscheinlich noch unterhalb der Werte des Frühholozäns liegt, stellt sie wegen ihres globalen Charakters und ihrer Veränderungsgeschwindigkeit eine Besonderheit im Holozän dar. Allein daraus kann aber noch nicht zweifelsfrei auf menschliche Verursachung geschlossen werden. Das ist auch nicht nötig, zur Ursachenfrage siehe 7.

Zwischenbilanz:

- Natürlich verursachte Temperaturveränderungen sind während des Holozän immer wieder vorgekommen. Sie verliefen aber nicht global, sondern weltweit unterschiedlich.
- Die aktuelle Erwärmung von 0,9 °C global erreicht lokal bereits über 2 °C und ist als globales Phänomen nachweisbar.
- Die globale Erwärmung geschieht so schnell, wie sie während des Holozän bisher nur lokal vorkam.

⁴⁴ [www.eike-klima-energie.eu/2012/02/25/g-l-o-b-a-l-c-o-o-l-i-n-g-wo-bleibt-die-erderwaermung/; 19.11.2019].

⁴⁵ [www.br.de/nachrichten/wissen/temperaturen-steigen-40-mal-schneller-als-nach-letzter-eiszeit,RYeLeIy; 3.10.2019].

⁴⁶ ZAMG Informationsportal Klimawandel [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/palaeoklima/125.000-jahre; 19.11.2019].



Norwegischer Fjord

6. Folgen der globalen Erwärmung

Jede Klimaveränderung kennt Gewinner und Verlierer. Betroffene Arten müssen sich anpassen, abwandern oder im schlimmsten Fall aussterben. Von welchen unmittelbaren Folgen ist die Tier- und Pflanzenwelt wie auch der Mensch aktuell betroffen?

Zusammen mit der globalen Erwärmung tritt eine veränderte Verteilung und Menge des Regens auf: Niederschläge fallen in anderen Intervallen als bisher üblich oder verteilen sich neu auf die Jahreszeiten. „Bei der Kartierung großflächiger Trends der einfallenden Niederschlagsmenge seit 1900 zeigen sich regional deutliche Unterschiede. Mehr Niederschlag entfiel besonders auf Kanada, Nordeuropa, Westindien und Ostaustralien. Rückgänge von bis zu 50 % wurden besonders in West- und Ostafrika und im Westen Lateinamerikas gemessen. Zu beachten ist, dass ein einzelnes Ereignis nie direkt auf die globale Erwärmung zurückgeführt werden kann. Unter den Bedingungen des Klimawandels verändert sich aber die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher Ereignisse“. Insbesondere konnte bisher kein einzelner tropischer Wirbelsturm direkt mit dem Klimawandel in Verbindung gebracht werden.⁴⁷

Allerdings wurde ermittelt, dass die höheren Temperaturen mehr Wasserdampf in die Atmosphäre bringen, was die Wirbelstürme möglicherweise verstärkt. Gleichzeitig verlangsamt sich die atmosphärische Zirkulation in den Tropen, sodass Stürme langsamer ziehen und lokal mehr Unheil anrichten.⁴⁸ Ebenso haben sich die saisonalen Temperaturanomalien hin zu höheren Werten verschoben, und die davon betroffenen Gebiete nahmen von 1% (1951–1980) auf mehr als 10 % der Erdoberfläche zu.⁴⁹ Ungewöhnliche Hitze- und Dürreperioden wie die von 2018 werden mit den Modellen der Attributionsforschung als Folge der globalen Erwärmung sichtbar: als „Fingerabdruck des Klimawandels“.⁵⁰ Aber „die wirklich spannende Frage, ob solch extreme Dürren häufiger – oder vielleicht sogar seltener – auftreten werden, kann die Klimaforschung eben noch nicht beantworten“.⁵¹ Eine weitere Konsequenz der globalen Erwärmung ist die Verlagerung der ozeanischen Randströme auf der Nord- und Südhalbkugel. Sie werden stärker (mit Ausnahme des Golfstroms) und verlagern sich in Richtung Pol. Dabei bringen sie mehr Wärme und somit Sturmgefahr in die gemäßigten Breiten.⁵² Die Klimazonen verlagern sich in Richtung der Pole.

Das Schmelzen der Gletscher ist ein jedermann sichtbarer Indikator der modernen Erwärmung. Allerdings hatten im Laufe des Holozän die Gletscherflächen der Alpen und Skandinaviens oftmals eine weit geringere Ausdehnung als heute. So gibt der abschmelzende Pasterzengletscher am Fuße des Großglockners uralte Baumstämme frei: Dort hoch oben, wo sich

⁴⁷ World Meteorological Organization (WMO) 2009. Zitiert aus: [https://de.wikipedia.org/wiki/Folgen_der_globalen_Erwärmung#Anstieg_der_Meeresspiegel; 4.10.2019].

⁴⁸ J. P. Kossin, 2018: A global slowdown of tropical-cyclone translation speed [www.nature.com/articles/s41586-018-0158-3; 4.10.2019].

⁴⁹ J. E. Hansen u. a., 2012: Perception of climate change [<https://doi.org/10.1073/pnas.1205276109>; 4.10.2019].

⁵⁰ S. Sippel u. a., 2020: Climate change now detectable from any single day of weather at global scale [www.nature.com/articles/s41588-019-0666-7.epdf; 20.01.2020].

⁵¹ D. Maraun: Das Wetterproblem [www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/hitze-das-wetterproblem-der-klimaforschung-a-1274868.html; 20.01.2020].

⁵² R. Röchert, 2016: Ozeanische Randströme werden stärker und verlagern sich Richtung Pol [<https://idw-online.de/de/news655203>; 3.11.2019], siehe auch: H. Yang u. a., 2016: Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate [<https://doi.org/10.1002/2015JC011513>; 17.01.2020];

heute der Gletscher zurückzieht, wuchs noch bis vor 3.500 Jahren ein Wald mit teils hochstämmigen Zirbelkiefern.⁵³

Die weltweiten Gletscher sind von großer Bedeutung für die Trinkwasserversorgung. H. Pritchard hat Daten zum jahreszeitabhängigen Wachsen und Schrumpfen der Gletscher entlang der Himalaya-Gebirgskette ausgewertet. „Die gigantischen Wassermassen, die jeden Sommer aus den Gletschern freigesetzt werden, reichen theoretisch zur Grundversorgung von 136 Millionen Menschen während der vier heißesten Monate von Juni bis September“.⁵⁴ Sollten die Gletscher in längeren Verläufen deutlich schrumpfen, wäre das dann auch ein Süßwasserproblem.

Die unvermeidliche Folge des Abschmelzens der Gletscher und Eisschilde ist ein Meeresspiegelanstieg. Abb.16 zeigt den (sehr unterschiedlichen) Anstieg pro Jahr in einzelnen Regionen im Vergleich mit der dortigen Erwärmung:⁵⁵

Aktueller Anstieg des Meeresspiegels in mm pro Jahr

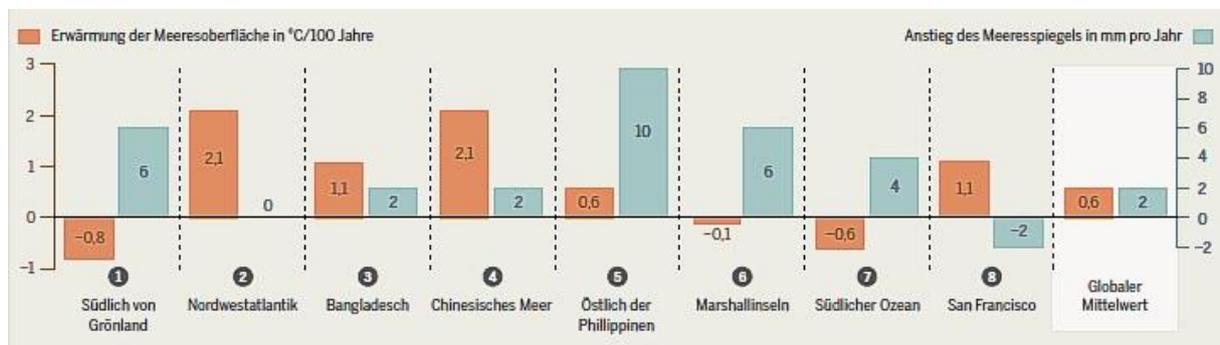


Abb.16

Quelle: Meeresatlas 2017

Global ergibt sich ein Anstiegstrend zwischen 1901 und 2010 von ca. 1,7 cm pro Jahrzehnt, wobei sich die Anstiegs-Geschwindigkeit seit 1993 auf ca. 3,2 cm pro Jahrzehnt erhöht hat. Seit 1875 beträgt der globale Meeresspiegelanstieg bereits 25 cm, dazu Abb.17:⁵⁶

⁵³ [www.sn.at/wiki/Pasterze_gibt_Baumstamm_nach_tausenden_von_Jahren_fre; 28.10.2019].

⁵⁴ Scinexx.de 2017 [www.scinexx.de/news/geowissen/asiens-gletscher-schuetzen-gegen-duerre/; 28.10.2019].

⁵⁵ Meeresatlas 2017, Heinrich Böll Stiftung Schleswig-Holstein.

⁵⁶ IPCC, Climate Change 2013. Zitiert aus: [https://de.wikipedia.org/wiki/Folgen_der_globalen_Erwärmung#Anstieg_der_Meeresspiegel; 4.10.2019].

Verlauf des globalen Meeresspiegelanstiegs

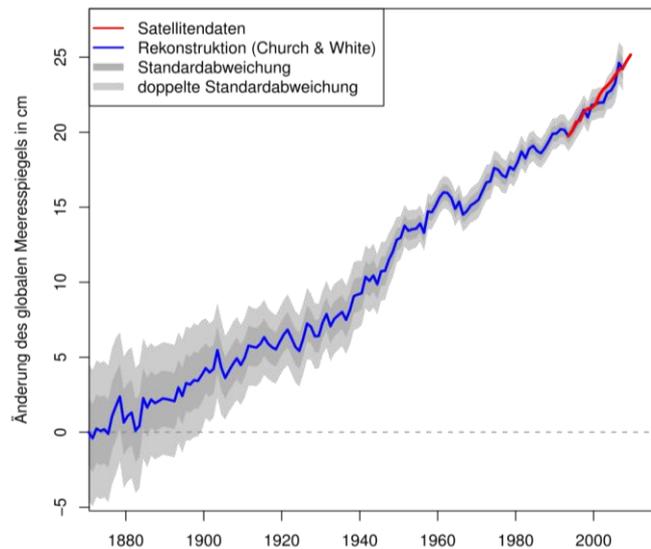


Abb.17

Quelle IPCC (2013)

Globaler Meeresspiegelanstieg 2006–2015, Ursachen

In Abb.18 ist eine Ursachen-Abschätzung für den Meeresspiegelanstieg dargestellt.⁵⁷ Wir sehen unten die Ausdehnung des Meerwassers bei Temperaturerhöhung (thermale Expansion oder *thermosterischer* Anstieg). Oben ist der Anteil der Gletscher- und Eisschild-Schmelze dargestellt. Das Schmelzen arktischen Eises hat keine Auswirkungen, es schwimmt und verdrängt so viel Wasser, wie es selbst wiegt. Die Daten zu ‚Wasserspeicher auf dem Land‘ sind umstritten.

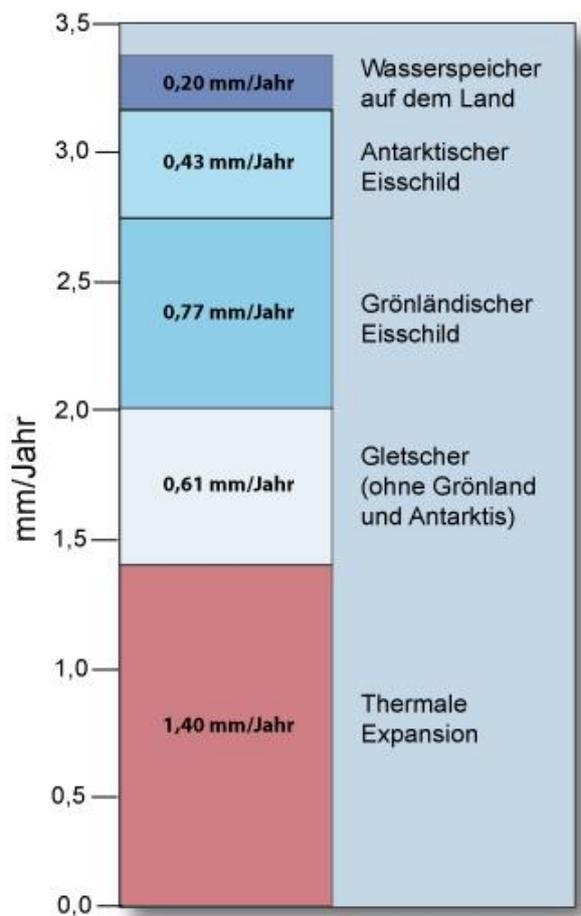


Abb.18

Daten nach IPCC (2019)

⁵⁷ [<https://bildungsserver.hamburg.de/meeresspiegelanstieg/4539836/meeresspiegel-ursachen;> 4.10.2019].

Der Fortgang des Meeresspiegelanstiegs wurde zwischenzeitlich unter dem Hinweis bezweifelt, er sei seit 2008 zum Stillstand gekommen. Tatsächlich gab es eine Stagnation zwischen 2008 und 2011 infolge natürlicher Effekte (ENSO-Phänomen) – und danach aber setzt sich der Anstiegstrend unverändert fort.⁵⁸

Als Folge der Erwärmung hat der globale Sauerstoffgehalt der Weltmeere in den oberen Schichten während der vergangenen 50 Jahre bereits um 2 % abgenommen.⁵⁹ Zugleich ist der Säuregehalt im Meer gestiegen (Abnahme des pH-Werts um ca. 0,1: z. B. Rossmeer, Kalifornienstrom, Benguelastrom).⁶⁰ Die pH-Wert-Abnahme des Meeresoberflächenwassers um 0,1 entspricht einem Anstieg des Säuregehalts um 26 % (gemessen als Wasserstoffionenkonzentration).⁶¹

Die Folgen dieser Versauerung werden differenziert gesehen. Das Skelettwachstum der Korallen z. B. wird geschwächt, manche Kalkalgen dagegen bilden unter CO₂-Einfluss größere Schalen.⁶² Nicht alle Arten werden sich anpassen können und wo Meeres-Ökosysteme parallel von Versauerung, Erwärmung und Sauerstoffverlust unter Druck gesetzt werden, entsteht zweifellos eine besonders starke Belastung.

Neben den bisher genannten Folgen globaler Erwärmung gibt es auch solche, die zu positiven Rückkopplungen führen (d.h. die Erwärmungs-Tendenz verstärken). Ein Beispiel dafür ist der Eis-Albedo-Effekt, der im arktischen Meer bereits jetzt eine positive Rückkopplung verursacht. Schnee reflektiert 85-90 % der auftreffenden Sonneneinstrahlung. Dort wo Eis und Schnee abgeschmolzen sind, trifft die Strahlung unmittelbar auf die Wasseroberfläche, diese reflektiert nur noch 10 %. Das Wasser erwärmt sich nun noch stärker. Dazu kommt eine zweite Rückkopplung, da die Packeisdecke zuvor auch den Wärmefluss zwischen Ozean und Atmosphäre abgeschirmt hat, was nach dem Abtauen nicht mehr der Fall ist.

Zwischenbilanz:

- Niederschlagsveränderungen, Dürren oder Wirbelstürme lassen sich im Einzelfall nicht gesichert auf den Klimawandel zurückführen, jedoch steigt deren Wahrscheinlichkeit durch die globale Erwärmung. Die atmosphärische Zirkulation und die ozeanischen Randströme verändern sich, ebenso die Klimazonen.
- Der Meeresspiegel ist seit 1875 im Mittel um 25 cm gestiegen. Die Sauerstoffkonzentration an der Meeresoberfläche hat abgenommen und die Versauerung der Meere hat zugenommen.
- Als Folge der globalen Erwärmung treten Rückkopplungseffekte auf und verstärken die Erwärmungstendenz.

⁵⁸ [www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-der-meeresspiegel-steigt-gar-nicht; 4.10.2019].

⁵⁹ Pressemeldung Uni Kiel, 2017 [www.uni-kiel.de/pressemeldungen/index.php?pmid=2017-043-sauerstoff; 6.11.2019]. Originalpublikation: S. Schmidtko u. a., 2017: Decline in global oxygen content during the past five decades [http://dx.doi.org/10.1038/nature21399; 06.11.2019].

⁶⁰ Meeresatlas 2017, Heinrich Böll Stiftung Schleswig-Holstein.

⁶¹ IPCC, Synthesebericht „Klimaänderung 2014“, S.41.

⁶² M. D. Iglesias-Rodriguez u.a., 2008: Phytoplankton Calcification in a High-CO₂ World [https://science.sciencemag.org/content/320/5874/336.abstract; 20.11.2019].



Alaska, kalbender Gletscher

7. Tatsächliche Wirksamkeit der Treibhausgase

Wenn einerseits die Fakten zum Treibhausgas-Anstieg in der Atmosphäre klar sind und andererseits die der globalen Erwärmung ebenso, dann stellt sich die Frage, ob beides miteinander zusammenhängt. CO₂ ist nach Wasserdampf das zweitwichtigste Treibhausgas. Beeinflusst der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration das Klima?

Genau das wird häufig bestritten. CO₂ könne seine Wirkung als Treibhausgas nur in viel höherer Konzentration entfalten, als es in der Atmosphäre vorliegt. Und tatsächlich werden Versuche zum Nachweis des Treibhauspotenzials von CO₂ mit Anteilen im Prozent- statt ppm-Bereich durchgeführt. Das hat Gründe: „Für den Versuch ist eine höhere Konzentration zwingend erforderlich. Bei der Absorption der Strahlung kommt es nämlich auf die Konzentration UND die Strecke der Strahlung im Ausbreitungsmedium an. In der echten Atmosphäre beträgt die Strecke, die dem Kohlendioxid zur Absorption zur Verfügung steht, viele Kilometer in der Versuchsatmosphäre wenige Zentimeter“.⁶³ Um diesen Faktor auszugleichen, muss die Konzentration in der Versuchsanordnung erhöht werden.

Zur Klärung der CO₂-Frage liefert die Strahlungsabsorption durch Treibhausgase wichtige Hinweise. Die Absorption (lat. *einsaugen*, *verschlingen*) der infraroten Wärmeabstrahlung geschieht innerhalb bestimmter Wellenlängenbereiche (sog. Absorptionsbanden). Wasserdampf absorbiert in breiten Bereichen, deshalb ist Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas. CO₂ ist nicht so breit wirksam, absorbiert jedoch Strahlung in Bereichen, die Wasserdampf nicht abdeckt. CO₂ schließt somit teilweise das „Fenster“, durch das die von der Erde abgestrahlte Wärme in den Weltraum entweichen kann, dazu Abb.19:⁶⁴

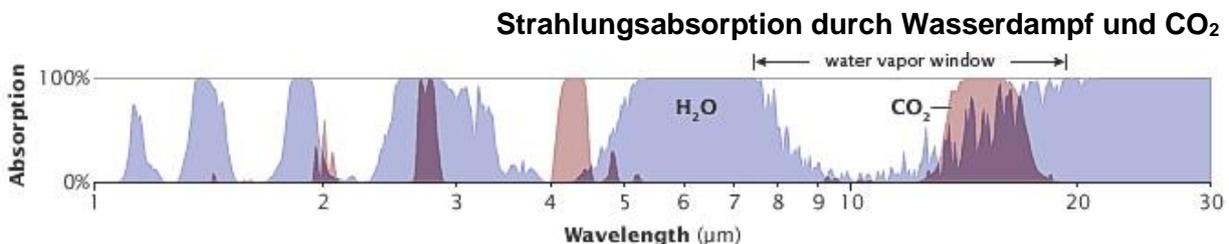


Abb.19

Quelle: NASA (2009)

Die Absorptionsbanden von Wasserdampf (graublau) und CO₂ (rosa) überlappen sich zum Teil (lila). In zwei relevanten Bereichen schränkt CO₂ die Wärmeabstrahlung deutlich ein. Auch die anderen Treibhausgase sind innerhalb solcher Absorptionsbanden wirksam (hier nicht dargestellt).

Bisweilen wird die CO₂-Absorption unter dem Hinweis bezweifelt, die 15µm-Bande sei gesättigt (das besagt, dass auf dieser Frequenz die Infrarotstrahlung durch CO₂ bereits vollständig absorbiert wird, so dass eine Zunahme des CO₂-Anteils zu keiner weiteren Absorption mehr führen kann – und also zu keinem zusätzlichen Treibhauseffekt). Doch die Sättigung ist von der genauen Wellenlänge (Spektrallinie) abhängig. Nicht alle Spektrallinien sind gesättigt, insbesondere nicht in den Flanken der 15 µm-Bande.⁶⁵ Und dies gilt analog auch für die

⁶³ V. Quaschnig [www.volker-quaschnig.de/artikel/Fakten-Kohlendioxid/index.php; 4.10.2019].

⁶⁴ NASA, R. Rohde 2009. 2014. Zitiert aus: [https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page7.php; 17.11.2019].

⁶⁵ G. Hoffmann, 2009: Sie ist gesättigt, sie ist es nicht, sie ist gesättigt, ... Anmerkungen zum Strahlungstransport [http://scienceblogs.de/primaklima/2009/03/31/sie-ist-gesattigt-sie-ist-es-nicht-sie-ist-gesattigt-anmerkungen-zum-strahlungstransport/; 11.11.2019].

anderen Treibhausgasen.⁶⁶ Die Sättigung ist also kein Gegenargument – und das zeigt auch die Praxis:

2001 gelang der Nachweis der Erderwärmung durch infrarotaktive Spurengase. J. Harries u. a. griffen dazu auf Daten der Satelliten ADEOS (Japan 1997) und IRIS (USA 1970) zurück. Beide Satelliten haben die von der Erde ausgehende langwellige Strahlung aufgezeichnet. Die Differenzspektren der Jahre 1970 und 1997 bestätigten eine deutliche Abnahme der Infrarotabstrahlung der Atmosphäre – und zwar genau im Bereich der Absorptionsbanden der Gase Kohlendioxid, Methan, Ozon und bestimmter Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Hierzu Harris: „Diese einzigartigen Satellitendaten – gewonnen innerhalb von 27 Jahren – zeigen zum ersten Mal realistische Spektraldifferenzen, die mit den Veränderungen von Treibhausgasen über einen langen Zeitraum zusammenhängen“.⁶⁷ D. R. Feldman u. a. veröffentlichten 2015 einen analogen beobachtungsbasierten Nachweis für den Zeitraum 2000 bis 2010.⁶⁸

Parallel zur *Zunahme* der Treibhausgase wurde also die tatsächliche *Abnahme* der Infrarotabstrahlung im Bereich der zugehörigen Absorptionsbanden nachgewiesen. Das ist ein deutlicher Hinweis auf den *Zusammenhang zwischen steigender Treibhausgaskonzentration und Klimawandel*. Die grundsätzliche Wirksamkeit des Treibhausgas-Anstiegs steht damit außer Frage: der anthropogene Treibhauseffekt.

Wir betrachten jetzt noch Gegenargumente, welche denkbare weitere Ursachen der globalen Erwärmung thematisieren. Da die Prozesse nicht restlos verstanden sind, die hinter den natürlichen Klimaschwankungen stehen (z. B. mittelalterliche Wärmephase), könnten auch an der aktuellen Erwärmung natürliche Ursachen beteiligt sein – z. B. die Sonnenaktivität. Die Sonne ist unser Energielieferant, und Änderungen der Sonneneinstrahlung haben naturgemäß Einfluss auf das Klima. Ein Vergleich der globalen Mitteltemperaturen und der Sonnenaktivität der letzten tausend Jahre zeigt tatsächlich große Übereinstimmung. Doch in den letzten Jahrzehnten laufen Temperaturentwicklung und Sonnenaktivität auseinander, das zeigt Abb.20:⁶⁹

⁶⁶ DMG 1999: Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft zu den Grundlagen des Treibhauseffektes [www.dmg-ev.de/wp-content/uploads/2015/12/treibhauseffekt.pdf; 11.11.2019].

⁶⁷ Spektrum.de 2001 [www.spektrum.de/news/direkter-nachweis-des-treibhauseffektes/571451; 4.10.2019]. Originalpublikation: J. E. Harries u. a., 2001: Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997 [www.nature.com/articles/35074154.epdf; 4.10.2019].

⁶⁸ D. R. Feldman u. a., 2015: Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010 [<https://doi.org/10.1038/nature14240>; 4.10.2019].

⁶⁹ Datei https://de.wikipedia.org/wiki/Globale_Erwärmung#/media/Datei:Temp-sunspot-co2.svg, 2009. Zitiert aus: [https://de.wikipedia.org/wiki/Globale_Erwärmung; 10.12.2019].

Sonnenflecken, CO₂-Konzentration und globale Erwärmung

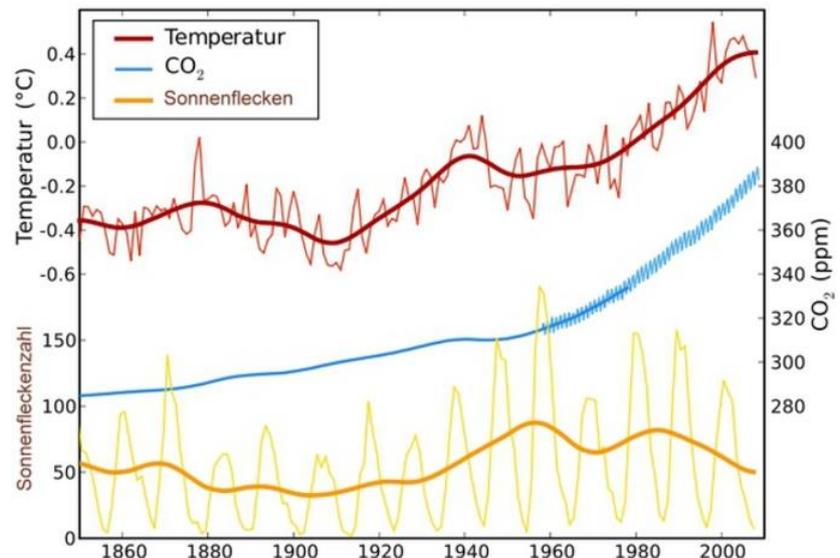


Abb.20

Quelle: L. McInnes (2009)

Obwohl bei der globalen Erwärmung ein gewisser Beitrag der Sonne nahe liegt, hat „spätestens seit etwa 1980 der verstärkte Treibhauseffekt durch die Zunahme von Kohlendioxid in der Atmosphäre die Überhand gewonnen“.⁷⁰ Nach heute überwiegender Auffassung sind die Änderungen der Sonnenaktivität zu schwach, um als direkte Ursache des Klimawandels zu gelten. Die seit dem 17. Jahrhundert beobachtete Erderwärmung hätte dafür eine bis zu fünf-fach stärkere Änderung der Sonnenaktivität erfordert.⁷¹ Allerdings ist bisher noch weitgehend unbekannt, in welchem Maße die UV-Strahlung der Sonne zum Klimawandel beiträgt, das Geschehen ist höchst komplex.⁷²

Einige Wissenschaftler vermuten darüber hinaus, dass die Wechselwirkung zwischen Sonnenaktivität und kosmischer Strahlung die eigentliche Ursache für Klimaänderungen sein könnte. Dringen hochenergetische Teilchen in die Erdatmosphäre ein, führen sie zur Bildung von Ionen, die wiederum als Kondensationskeime für Wassertröpfchen dienen können. „Die kosmische Strahlung könnte also, so die Überlegung, den Bewölkungsgrad und damit das Klima beeinflussen“. Bei alledem sind jedoch weder das exakte Ausmaß noch die genauen Wirkungsmechanismen klar. Satellitenmessungen bestätigten bislang keine Korrelation von einfallender kosmischer Strahlung und Wolkenbildung.⁷³

Noch bestehende offene Fragen werden möglicherweise das bisher angenommene Ausmaß der Treibhausgas-Wirkung korrigieren – nicht aber den grundsätzlichen Zusammenhang von Treibhausgasen und Klimawandel. Der erbrachte Nachweis der tatsächlichen Erderwärmung durch infrarotaktive Spurengase lässt keinen Zweifel an deren Wirksamkeit. Dieser Erkennt-

⁷⁰ Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, 2009 [www.mps.mpg.de/442697/19Der-Einfluss-der-Sonne-auf-das-Erdklima.pdf; 10.12.2019].

⁷¹ Max-Planck-Gesellschaft 2006 [www.mpg.de/519948/pressemitteilung200609134; 28.10.2019].

⁷² C. E. Williamson u. a., 2014: Solar ultraviolet radiation in a changing climate [https://doi.org/10.1038/nclimate2225; 17.01.2020].

⁷³ Welt der Physik 2009 [www.weltderphysik.de/thema/hinter-den-dingen/sonne-und-klima/; 10.12.2019].

nisstand schlägt sich in folgendem Satz nieder: „Der IPCC ist nun zu 95 Prozent sicher, dass Menschen die Hauptursache der derzeitigen globalen Erwärmung sind“.⁷⁴

Zwischenbilanz:

- Treibhausgase absorbieren die Wärmeabstrahlung der Erde innerhalb bestimmter Wellenlängenbereiche. Wasserdampf und Spurengase ergänzen sich dabei.
- Für 1970 bis 1997 sowie 2000 bis 2010 wurde die tatsächliche Abnahme der atmosphärischen Infrarotabstrahlung im Bereich der Absorptionsbanden von CO₂, Methan u. a. nachgewiesen. Damit ist die Klima-Relevanz dieser Spurengase bei wachsender atmosphärischer Konzentration bestätigt.
- Da die wachsende Treibhausgas-Konzentration hauptsächlich durch anthropogene Emissionen verursacht wird, ist dies zugleich eine klare Bestätigung des Zusammenhangs zwischen menschlichem Handeln und Klimawandel.
- In welchem Ausmaß natürliche Ursachen zusätzlich Einfluss auf die globale Erwärmung haben (UV-Strahlung, kosmische Strahlung, ...), lässt sich derzeit nicht genau sagen. Aber der durch anthropogene Emission verstärkte Treibhauseffekt gilt als Hauptursache der globalen Erwärmung.

⁷⁴ IPCC, Synthesebericht „Klimaänderungen 2014“, Vorwort.



Island, Vulkane

8. Klimamodelle

Wir verfügen also über Nachweise hinsichtlich des wachsenden Treibhausgas-Anteils in der Atmosphäre wie auch hinsichtlich dessen Auswirkung auf das Klimageschehen. Aber die eigentlich dringliche Frage ist ja eine andere: Wie wird sich der erreichte und weiterhin steigende Anteil atmosphärischer Treibhausgase *zukünftig* auswirken und welche Beeinträchtigungen haben wir zu erwarten?

Klimamodelle versuchen diese Frage zu beantworten. Das ist naturgemäß schwierig, denn ein Klimamodell muss den ganzen Globus abdecken und dabei aber auch Prozesse auf mikroskopischer Skala berücksichtigen (z. B. Wärmediffusion oder Kondensation von Wasserdampf zu Wolken). Das Modell legt ein Netz aus kastenförmigen Elementen über die gesamte Erde. Atmosphäre und Ozeane werden dabei in übereinander liegende Schichten zerlegt. Eine typische räumliche Auflösung für die Modelle liegt heute bei 10 bis 100 km. Sie laufen in der Regel mit Zeitschritten von einer halben Stunde und simulieren das Klima für Jahrzehnte oder Jahrhunderte in die Vergangenheit und in die Zukunft. Abb.21 zeigt das Prinzip:⁷⁵

Allgemeine Charakteristik eines dreidimensionalen Klimamodells

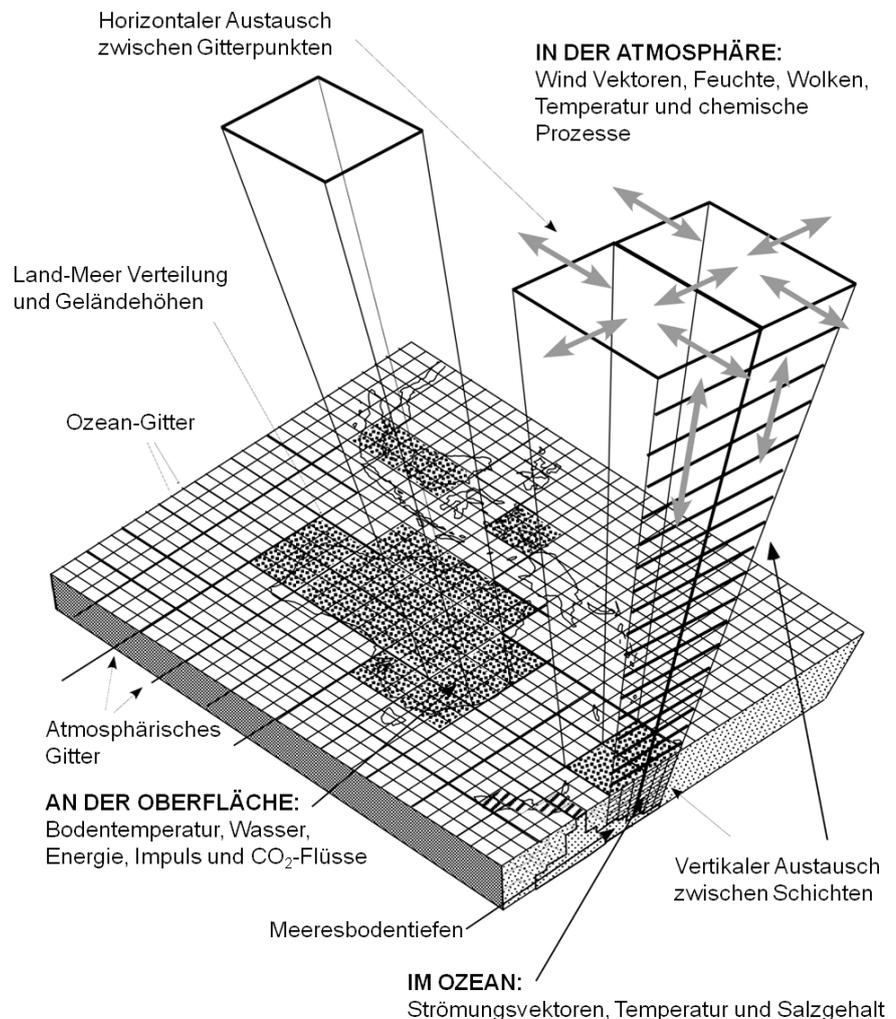


Abb.21

Quelle: McCuffie und Henderson-Sellers (2005), bearbeitet

⁷⁵ ZAMG Informationsportal Klimawandel [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/globale-klimamodelle; 21.11.2019].

Der IPCC-Bericht Klimaänderung 2013 nennt die Resultate: Im Zeitraum von 2081 bis 2100 könnten die Temperaturen um 1,5 bis 4 Grad plus x höher liegen als zwischen 1986 und 2005. Solche Informationen kann man leicht für wertlos halten. Weshalb die große Bandbreite?

Die Modelle haben *Szenarien* zur Grundlage, die sich in ihren Annahmen zur künftigen Gesellschaft unterscheiden: ob die Treibhausgas-Emission gestoppt, vermindert oder weiterhin gesteigert wird, ferner zum Wachstum der Weltbevölkerung, zum zukünftigen Pro-Kopf-Bedarf an Energie, Nahrung und Alltagsgütern sowie zur Nutzung der Erdoberfläche. Dabei steht das Szenario RCP2.6 für ehrgeizige Klimaschutzziele und RCP8.5 für „weiter so wie bisher“, zwei weitere liegen dazwischen. Je nach Szenario fallen die Resultate unterschiedlich aus und der seit Jahren wachsende Energiebedarf entspricht bisher leider dem ungünstigsten IPCC-Szenario RCP8.5. Heraus kommen also keine Prognosen, sondern *Projektionen* unter jeweils zugrundeliegenden Szenarien. In Abb.22 sehen wir die Projektion der globalen Temperaturentwicklung:⁷⁶

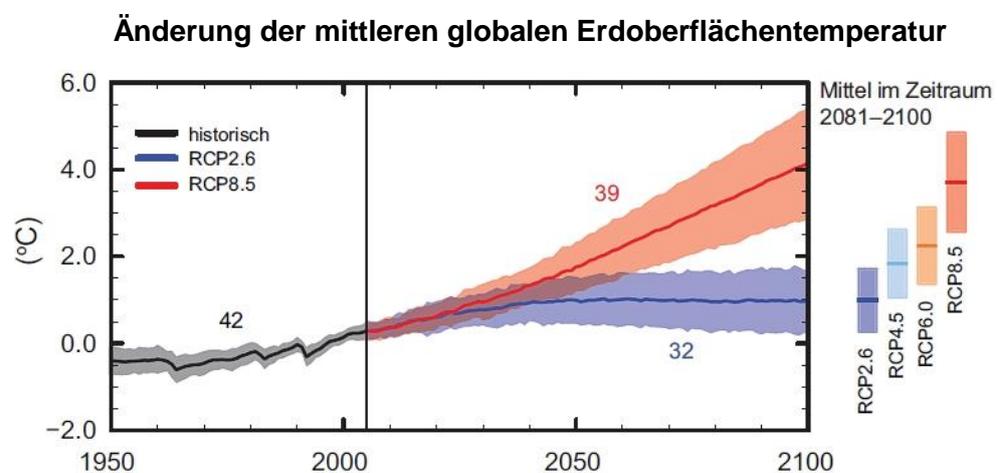


Abb.22

Quelle: IPCC (2013)

Rechts die Legende mit IPCC-Standardszenarien, die den jeweiligen Rechnungen zugrunde liegen.

Trotz enormer Komplexität können Klimamodelle immer nur vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit liefern. Dass diese vereinfachten Abbildungen dennoch keineswegs wertlos sind, zeigt ihre Anwendung auf die Vergangenheit. Modellrechnungen bilden die tatsächliche Entwicklung der Erdmitteltemperatur seit Mitte des 19. Jahrhunderts ziemlich gut nach. Die Berechnungen zeigen ferner, „dass die Erderwärmung ohne den Effekt natürlicher Klimaeinflüsse höher ausgefallen wäre, d.h. dass natürliche Einflüsse die menschengemachte Erwärmung etwas gedämpft haben“.⁷⁷ Darüber hinaus gilt ebenso, „dass anthropogene Aerosole der Erwärmung entgegen gewirkt haben, die sonst noch höher ausgefallen wäre“.⁷⁸ Interessanterweise rechnen die Modelle nach 1975 nur dann richtig, wenn sie das Zusammenspiel natürli-

⁷⁶ IPCC, Klimaänderung 2013, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, S.19.

⁷⁷ [www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-klimamodelle-sind-nicht-verlaesslich; 6.10.2019].

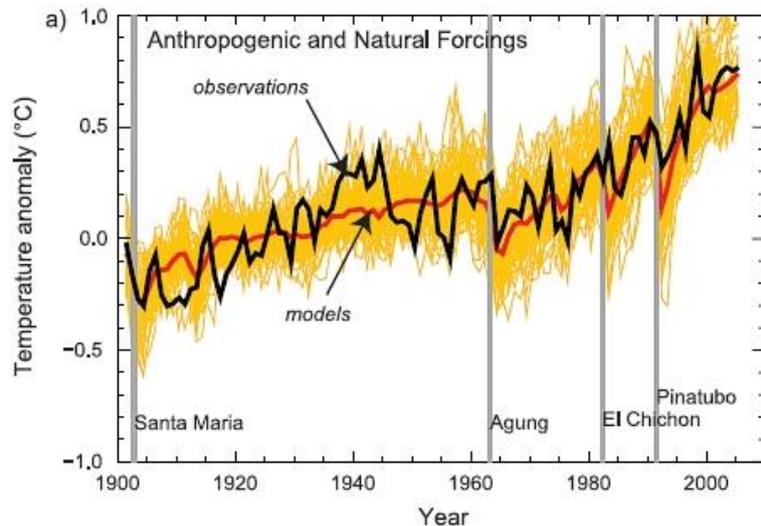
⁷⁸ [https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Wetterextreme_und_Klimawandel; 4.10.2019].

cher Einflüsse (z. B. Sonneneinstrahlung, Vulkanausbrüche) *und* menschenverursachter Einflüsse (Treibhausgas-Emission) berücksichtigen – das ist in Abb.23 zu sehen: ⁷⁹

Globale Temperaturentwicklung und Modellrechnung 1900–2005

a) Natürliche und durch Menschen verursachte Einflüsse

schwarz: gemittelte Messwerte, rot: Modellrechnung; beide Kurven korrelieren.



b) Einzig natürliche Einflüsse

schwarz: gemittelte Messwerte, blau: Modellrechnung.

Ab 1975 laufen die Kurven endgültig auseinander, die Modelle können ohne Berücksichtigung anthropogener Einflüsse die Wirklichkeit nicht mehr nachbilden.

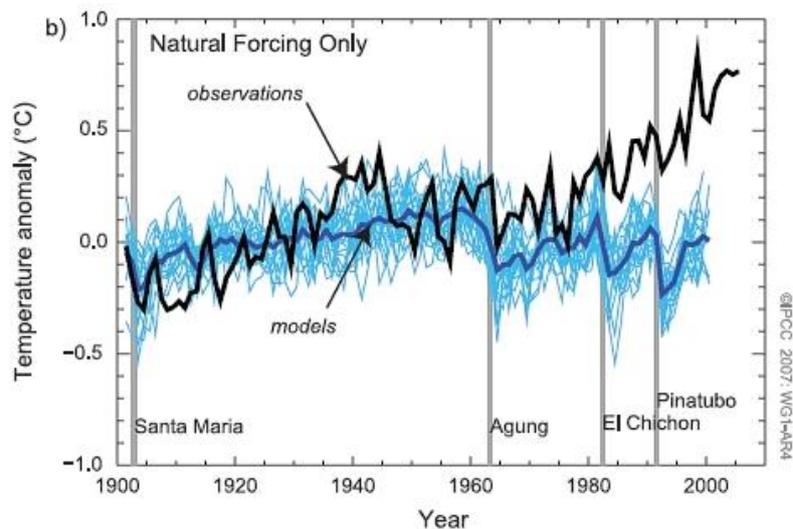


Abb.23

Quelle: IPCC (2007)

Die Modelle werden bisweilen kritisiert, weil durch Menschen verursachte Einflüsse „hineingesteckt“ würden, so dass sie nun auch „herauskommen“. Die Kritik übersieht jedoch, dass die Rechnungen bis ca. 1965 auch ohne menschliche Einflüsse die Vergangenheit gut darstellen und danach plötzlich nicht mehr. Das ist ein Hinweis darauf, dass der Klima-Einfluss des Menschen spätestens seit dieser Zeit an Bedeutung gewonnen hat; mit natürlichen Einflüssen allein ist die globale Temperaturentwicklung nicht mehr zu erklären.

Anhand des Ausbruchs des Vulkans Pinatubo 1991 konnte überprüft werden, wie zutreffend Modellrechnungen zur Auswirkung von Sulfat-Aerosolen auf das Klima sind. Die Modelle sagten die vorübergehende weltweite Abkühlung von ca. 0,5°C tatsächlich voraus (vgl. Abb.23a). Neben den erwähnten Erfolgen gab es auch Fälle von Nichtübereinstimmungen von Modellergebnissen mit der Realität. Das liegt vor allem an der mangelnden Vorhersehbarkeit

⁷⁹ IPCC Climate Change 2007, S.62.

von Rückkopplungseffekten (dazu mehr in 9.). Besonders deutlich war die Abweichung bei der Schmelze des arktischen Meereises während der Sommermonate, die in der Realität weit stärker ausfiel als vorausberechnet, dazu Abb.24:⁸⁰

Arktische Meereisausdehnung und Modellvorhersagen

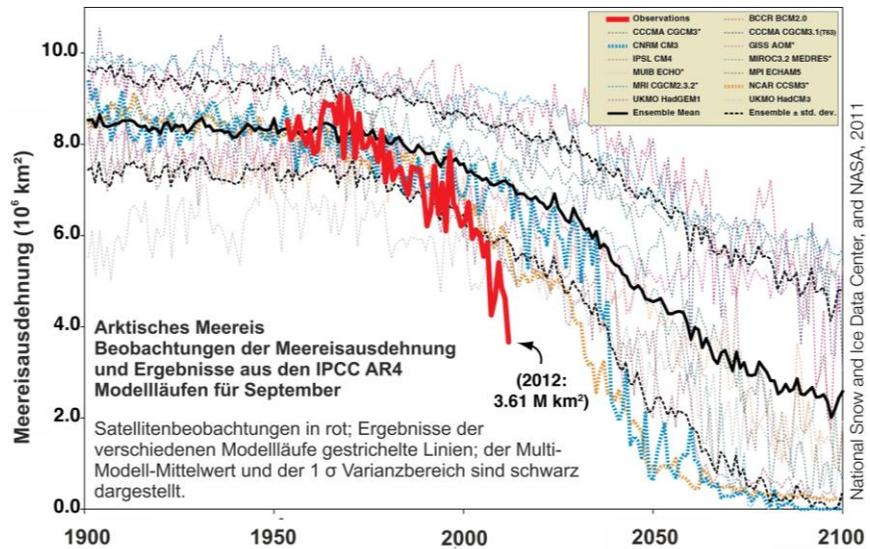


Abb.24

Quelle: IPCC/NSDC/Nasa/AWI (2011)

Die Projektion des Meeresspiegelanstiegs bis 2100 gab der IPCC 2013 zwischen 40 und 75 cm an (Mittelwert je nach Szenario) – dies zeigt Abb.25:⁸¹

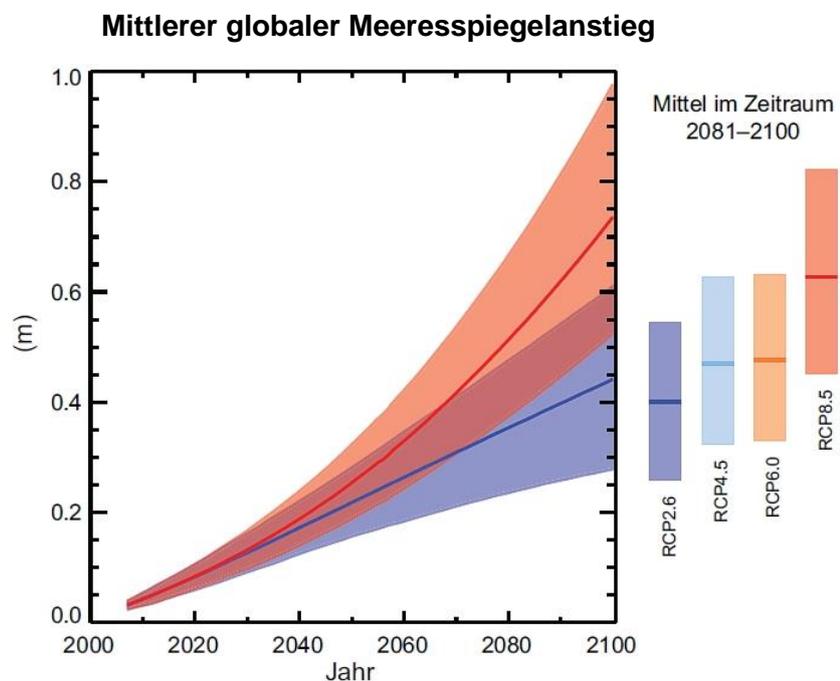


Abb.25

Quelle: IPCC (2013)

⁸⁰ IPCC Climate Change 2007, S.62.

⁸¹ IPCC, Klimaänderung 2013, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, S.24.

Die Modellergebnisse legen praktische Konsequenzen nahe. In einem Sonderbericht von 2018 fordert der IPCC die Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau. Als notwendige Voraussetzung errechnen die Modelle eine Verminderung der globalen anthropogenen Netto-CO₂-Emission bis 2030 um etwa 45 % gegenüber dem Niveau von 2010. Zwischen 2045 und 2055 muss dann die Emission netto null betragen („netto null“ bedeutet „unterm Strich null“, z. B. indem noch bestehende Emission durch Wiederaufforstung kompensiert wird). Bei Verfehlen des Ziels 2030 ist innerhalb der Modelle eine globale Erwärmung um 2 °C plus x nicht mehr abwendbar.⁸²

Die Forderung nach Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C hat gute Gründe. Zwar erleben wir lokale Temperaturunterschiede von 1,5 °C tagtäglich als völlig harmlos, aber bezogen auf die globale Temperatur sind 1,5 °C sehr viel. Für die letzte Warmzeit (da lag der Meeresspiegel 4 bis 6 Meter höher als heute) werden auf der Nordhemisphäre Sommer-Temperaturen um etwa 2 °C oberhalb des vorindustriellen Temperaturniveaus angegeben.⁸³ Nach J. Hansen lag die maximale Temperatur der letzten Warmzeit sogar nur 1,8 °C über dem Mittelwert von 1880-1920.⁸⁴

Zwischenbilanz:

- Klimamodelle sind vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit. Sie liefern keine Prognosen, sondern Projektionen auf der Grundlage bestimmter Szenarien der gesellschaftlichen Entwicklung.
- Klimamodelle sind anhand der Berechnungen realer Ereignisse der Vergangenheit „geeicht“. Dennoch können sie die Zukunft nicht sicher vorhersagen, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit.
- Eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C erfordert nach den Modellrechnungen eine Emissionsabsenkung um 45 % gegenüber 2010 schon bis 2030 sowie Netto-null-Emission bis etwa 2050.

⁸² IPCC Sonderbericht 1,5 °C Globale Erwärmung, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, S.16.

⁸³ [<https://de.wikipedia.org/wiki/Eem-Warmzeit>; 21.11.2019].

⁸⁴ J. Hansen u. a., 2013: Climate sensitivity, sea level and atmospheric carbon dioxide [<https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0294>; 18.12.2019].



Antarktis, Eisberg

9. Unwägbarkeiten und Plausibilitätsbetrachtung

Die Klimamodelle müssen nicht nur Annahmen zu gesellschaftlichen Szenarien machen, sondern darüber hinaus auch zu naturwissenschaftlichen Sachverhalten, die zum gegenwärtigen Wissensstand aber teilweise gar nicht bekannt sind.

Was den Meeresspiegelanstieg anbetrifft, so können zukünftige Veränderungen wegen des fehlenden Wissens über den Wirkungsmechanismus beim Kalben der Gletscher bisher nur unzureichend modelliert werden.⁸⁵ Neuere Studien rechnen deshalb mit 0,7 bis 1,2 m Meeresspiegelanstieg nach Szenario RCP8.5. „Der amerikanische Klimaforscher James Hansen hält selbst solche Schätzungen für deutlich zu niedrig. ... Auch wenn das Eis sehr verzögert auf die Erwärmung von Atmosphäre und Ozean reagiere, würden paläoklimatische Daten zeigen, dass es mehrfach einen Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern innerhalb eines Jahrhunderts durch den Zerfall von Festlandeis gegeben habe, sogar bei Erwärmungsraten unterhalb der für das 21. Jahrhundert erwarteten. Hansen hält deshalb auch einen Meeresspiegelanstieg von 5 m bis 2100 durchaus für möglich.“⁸⁶

Wie hat man sich die Risiken der Eisschmelze vorzustellen? Der Eismassenverlust Grönlands verläuft heute siebenmal schneller als noch in den 1990er Jahren. Nicht nur die Oberflächenerwärmung des Eises beschleunigt den Prozess. Erwärmtes Meerwasser greift die Gletscherzungen von unten an – dies wurde am „79°-Nord-Gletscher“ nachgewiesen und findet offenbar auch in anderen Gebieten Grönlands statt.⁸⁷ Das komplette Abschmelzen würde zu einem Meeresspiegelanstieg von etwa 7 m führen. Dafür wären allerdings mehrere Jahrhunderte bis Jahrtausende notwendig. Und selbst auf dem Höhepunkt der letzten Warmzeit war das Grönland-Eis nicht vollständig abgeschmolzen.⁸⁸ Dennoch bestehen zum Fortgang der Destabilisierung Unwägbarkeiten.⁸⁹

Für die Antarktis lässt sich der rasante Verlauf einer historischen Eisschmelze belegen. In der Südatlantik verläuft die Hauptroute der treibenden antarktischen Eisberge, welche dort schließlich schmelzen und ihr mitgebrachtes Geröll im Meer ablagern. Sedimentkern-Daten zeigen einen ungewöhnlich hohen Eismassenverlust vor 14.600 Jahren: genau zu der Zeit, als der weltweite Meeresspiegel binnen 500 Jahren um bis zu 16 Meter anstieg. Mithilfe von Klimamodellen konnte ermittelt werden, dass gegen Ende der letzten Eiszeit ungewöhnlich warme Wassermassen in Richtung Antarktis geströmt waren und den Abbruch von Schelfeis auslösten. Die schmelzenden Eismassen haben dann den Warmwassereinstrom in die Antarktis verstärkt: Eine positive Rückkopplung, welche die ursprünglich eher geringe Klimaveränderung erheblich verstärkte und dazu führte, dass immer mehr Eisberge abbrachen und der Eisschild viel schneller instabil wurde als bisher angenommen. Die Gefahr einer vergleichbaren Entwicklung besteht auch aktuell: „Besonders die Gletscher, die in die Amundensee flie-

⁸⁵ ZAMG Informationsportal Klimawandel [<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/eisschilde/groenland>; 21.11.2019].

⁸⁶ [https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Meeresspiegel_der_Zukunft; 6.10.2019].

⁸⁷ AWI 2020 [www.awi.de/ueber-uns/service/presse-detailansicht/presse/wie-das-meer-am-gletscher-nagt.html; 6.02.2020]. Originalpublikation: J. Schaffer u. a., 2020: Bathymetry constrains ocean heat supply to Greenland's largest glacier tongue [<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0529-x>, 6.02.2020].

⁸⁸ ZAMG Informationsportal Klimawandel [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/eisschilde/groenland; 21.11.2019].

⁸⁹ S. A. Khan u. a., 2016: Geodetic measurements reveal similarities between post–Last Glacial Maximum and present-day mass loss from the Greenland ice sheet [<http://advances.sciencemag.org/content/2/9/e1600931.full>; 17.01.2020].

ßen, zeigen diese hohen Rückzugsraten und sind – so Modellierungen – potentielle Kandidaten für einen Kollaps“.⁹⁰ Mittlerweile ist erwärmtes Wasser in der Amundsensee bis an die Aufsetzlinie einiger Schelfeise vorgedrungen. „Der Regimewechsel hat hier bereits stattgefunden“. Eine analoge Gefahr besteht auch für das Filchner-Ronne-Schelfeis.⁹¹

Schelfeis besteht aus im Meer schwimmenden oder auf dem Kontinentalrand aufsitzenden Eisplatten, die vom Festlandeis gespeist werden und mit diesem verbunden sind. Abb.26 zeigt ein Schema des antarktischen Schelfeises. Erwärmtes Wasser greift das Eis von unten an. Brechen große Mengen des Schelfeises ab, erhöht sich die Wasserzirkulation; es strömt nun noch mehr erwärmtes Wasser zu – und zusätzlich wird der Prozess durch die Eis-Albedo-Rückkopplung verstärkt. Das alles kann zur Erhöhung der Fließgeschwindigkeit des Festlandeises führen, wodurch es zu noch mehr Abbrüchen und damit innerhalb kurzer Zeiträume zu einem deutlichen Meeresspiegelanstieg kommt.⁹²

Antarktisches Schelfeis (Schema)

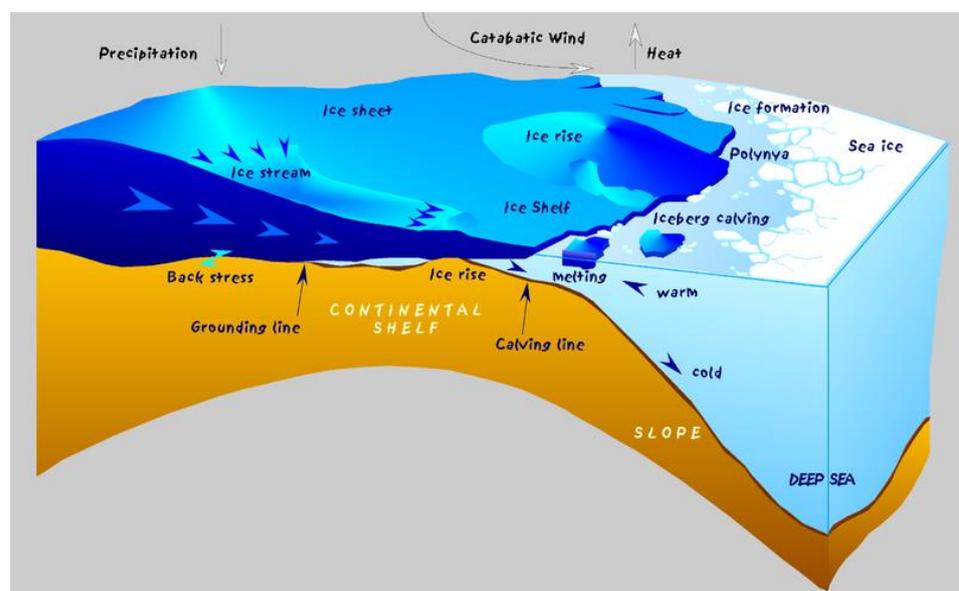


Abb.26

Quelle: H. Grobe, AWI (2000)

Die Dynamik der Eisschilde ist nicht der einzige Unsicherheitsfaktor der Klimamodelle. Ein weiterer betrifft die Abschätzung der Verweildauer der Treibhausgase in der Atmosphäre; für CO₂ z. B. gibt es erheblich unterschiedliche Annahmen. Daraus folgen aber ganz unterschiedliche Verläufe! Ebenso gravierend wirken sich die Unsicherheiten bei Rückkopplungsprozessen aus. Z. B. bestehen kontroverse Auffassungen zur Wasserdampf-Rückkopplung:

⁹⁰ G. Lohmann, 2014: Meeresspiegelanstieg um 16 Meter [www.solarify.eu/2014/05/31/333-meeresspiegelanstieg-um-16-meter/2/; 03.11.2019].

⁹¹ AWI 2017 [https://www.awi.de/ueber-uns/service/presse-detailansicht/presse/eine-unumkehrbare-ozeanerwaerung-bedroht-das-filchner-ronne-schelfeis.html; 17.01.2020]. Originalpublikation: H. H. Hellmer u. a., 2017: The Fate of the Southern Weddell Sea Continental Shelf in a Warming Climate [https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0420.1; 28.10.2019].

⁹² Datei https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Antarctic_shelf_ice_hg.png, AWI 2000. Zitiert aus: [https://de.wikipedia.org/wiki/Schelfeis; 28.10.2019].

Einerseits zeigt die Auswertung von Satellitendaten durch A. Dessler, „dass die Luftfeuchte ansteigt, wenn die Oberflächentemperatur steigt. Und da Wasserdampf auch selbst ein Treibhausgas ist, verstärkt die Zunahme der Feuchtigkeit die Erwärmung durch das Kohlendioxid. Konkret stellten die Forscher fest, dass eine Erwärmung von rund 1,5 Grad durch den damit verbundenen Anstieg des Wasserdampfs zwei Watt Energie pro Quadratmeter zusätzlich in der Atmosphäre festhält. ... Wir sind der Ansicht dass die Wasserdampf-Rückkopplung außerordentlich stark ist und die durch das Kohlendioxid erzeugte Erwärmung verdoppeln kann“.⁹³ In dieser Auffassung wird also von einer positiven Rückkopplung ausgegangen.

Nach gegenteiliger Auffassung aber führt mehr Wasserdampf – Kondensationskeime vorausgesetzt – zu mehr Wolken, d.h. zur Abschirmung vor Sonneneinstrahlung. Die globale Erwärmung infolge steigender CO₂-Konzentration wird dadurch abgeschwächt: eine negative Rückkopplung (auch Gegenkopplung genannt). G. Paltridge u. a. zeigen, dass die Feuchte in der mittleren und oberen Troposphäre zwischen 1973 und 2007 trotz steigender Temperaturen abnahm (dies spricht gegen die Wasserdampf-Rückkopplung).⁹⁴ Ebenso weisen R. L. Lindzen und Y.-S. Choi anhand der Messdaten des Satelliten ERBE nach, dass eine Gegenkopplung wirksam sein muss.⁹⁵

Die kontroversen Forschungsergebnisse führen zu unterschiedlichen Folgerungen bezüglich Ausmaß und Verlauf einer Erderwärmung durch Treibhausgase. Und es gibt noch weitere Unwägbarkeiten, zum Beispiel: ⁹⁶

- Bei der Erwärmung durch die Albedo-Rückkopplung wird die Rolle der Wolkenoberflächen in den Klimamodellen noch nicht befriedigend simuliert.
- Insgesamt ist noch nicht geklärt, ob der Gesamtbedeckungsgrad der Erde durch Wolken positiv oder negativ rückkoppelt (Vermindern der Wärmeabstrahlung versus Reflektion der Sonneneinstrahlung).
- Die Biosphäre sorgt für eine dämpfende negative Rückkopplung: Die Pflanzendecke der Kontinente gedeiht in einer warmen und feuchten Atmosphäre üppiger, entzieht damit der Atmosphäre mehr CO₂ und begrenzt dadurch die Erwärmung. In welchem Maße wird dieser Effekt künftig greifen, welcher derzeit je nach Witterungsbedingungen stark schwankt (vgl. Abb.6)?

Einige Wechselwirkungen und Rückkopplungen sind also strittig oder gar nicht bekannt, müssen aber dennoch im Modell abgebildet werden. „Zum Teil werden diese Prozesse parametrisiert (d.h. physikalische Zusammenhänge unbekannter zu bekannten Größen festgeschrieben), manche Prozesse bleiben aber derzeit auch gänzlich unberücksichtigt“.⁹⁷

„Gerade die negativen, stabilisierenden Rückkopplungen des Klimasystems der Erde liegen zurzeit im Kreuzfeuer der wissenschaftlichen und klimapolitischen Diskussion. Es gibt noch

⁹³ Scinexx.de 2008 [<https://www.scinexx.de/news/technik/wasserdampf-als-schlussel-faktor-fuer-die-klimaerwaermung/>; 4.10.2019].

⁹⁴ G. Paltridge u. a., 2009: Trends in middle- and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data [<https://doi.org/10.1007/s00704-009-0117-x>; 4.10.2019].

⁹⁵ R. S. Lindzen u. a., 2009: On the determination of climate feedbacks from ERBE data [<http://eaps.mit.edu/faculty/lindzen/235-LindzenGRL.pdf>; 4.10.2019].

⁹⁶ Vgl. dazu: ZAMG Informationsportal Klimawandel, Suchbegriffe: positive Rückkopplungen, negative Rückkopplungen.

⁹⁷ ZAMG Informationsportal Klimawandel [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/global-klimamodelle; 21.11.2019].

einiges zu klären und zu verstehen bei diesen Phänomenen. Gleichzeitig sind sie von entscheidendem Einfluss auf das, was man vereinfacht als Klimasensitivität (eng. *climate sensitivity*) bezeichnet, worunter meist die Reaktion der mittleren globalen Temperatur auf eine Verdopplung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre verstanden wird⁹⁸. Mit anderen Worten: die *Gleichgewichts-Klimasensitivität* (Equilibrium climate sensitivity: ECS) ist eine Kennzahl, welche den globalen Temperaturanstieg nennt, der sich aus einer gedachten Verdopplung der atmosphärischen CO₂-Konzentration gegenüber vorindustriellem Niveau ergeben würde. Dabei erreicht die Erwärmung aber erst Jahrhunderte nach der Verdopplung ihr Maximum, weil das Klima wegen der hohen Wärmekapazität der Weltmeere träge reagiert.⁹⁹ Der IPCC versteht unter ‚vorindustriell‘ eine CO₂-Konzentration von 280 ppm;¹⁰⁰ unter dieser Auffassung wäre die CO₂-Verdopplung also bei 560 ppm erreicht.

Anhand der messbaren Strahlungswirkung von CO₂ ergibt sich bei einer Verdopplung der Konzentration eine Klimasensitivität von 1,2 bis 1,3 °C.¹⁰¹ Doch es gilt ferner die Summe aller Rückkopplungen zu beachten, die nachfolgend im Erdklimasystem auftreten werden, und das macht die Sache schwierig. Im IPCC-Bericht Klimaveränderung 2013 wird der Wert der Gleichgewichts-Klimasensitivität zwischen wahrscheinlich 1,5 und 4,5 °C angenommen.¹⁰² Auf genauere Angaben konnten sich die Wissenschaftler wegen der genannten Schwierigkeiten nicht einigen. Es gibt allerdings auch Forscher, welche für die Klimasensitivität den sehr niedrigen Wert von 1 °C ansetzen, so z. B. R. L. Lindzen und Y.-S. Choi.¹⁰³

Die enorme Bandbreite der Annahme von 1 bis 4,5 °C globaler Erwärmung bei Treibhausgas-Verdopplung verwundert nicht angesichts der unterschiedlichen Antworten der Wissenschaftler auf die obigen Fragen. Zugleich ist aber eine um 4,5 °C erwärmte Welt eine ganz andere als eine um 1 °C erwärmte! Und je nach Klimasensitivität, die sich aus der jeweiligen Modellierung ergibt, gelangen wir zu ganz anderen Resultaten: Dies ist ein oft vorgetragener Einwand gegen die Glaubwürdigkeit der Klimamodelle. Zusätzlich zur Bandbreite der Szenarien ergibt sich noch eine weitere Bandbreite je nach zugrundeliegenden Auffassungen zu Wechselwirkungen und Rückkopplungen, die in den Modellen nur in parametrisierter Form dargestellt werden können oder unberücksichtigt bleiben. Die Klimamodelle liefern somit wesentliche Hinweise, doch die Ergebnisse werden nur dann punktgenau sein, falls die zugrunde gelegten Auffassungen zutreffen – und das lässt sich derzeit nicht zweifelsfrei sagen.

Nun sind allerdings auf kaum einem Gebiet – nicht nur in der Klimatologie – die Erkenntnisprozesse zu naturwissenschaftlichen Sachverhalten de facto abgeschlossen. Unser Wissen ist nie zu 100 % sicher. Handeln müssen wir aber trotzdem. Wir werden deshalb jetzt von noch offenen Theoriefragen absehen und anhand der realen Entwicklung eine robuste Plausibilitätsbetrachtung versuchen:

⁹⁸ ZAMG Informationsportal Klimawandel: [www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/rueckkopplungen/negative-rueckkopplungen; 21.11.2019].

⁹⁹ [<https://de.wikipedia.org/wiki/Klimasensitivität>; 21.11.2019].

¹⁰⁰ IPCC Climate Change 2013, Working Group I: The Science of Climate Change, S. 100.

¹⁰¹ J. W. Farley, 2008: The Scientific Case for Modern Anthropogenic Global Warming [<https://monthlyreview.org/2008/07/01/the-scientific-case-for-modern-anthropogenic-global-warming/>; 17.02.2020].

¹⁰² IPCC Climate Change 2013, Working Group I: The Science of Climate Change, S. 16.

¹⁰³ R. S. Lindzen u. a., 2011: On the Observational Determination of Climate Sensitivity and Its Implications [www-eaps.mit.edu/faculty/lindzen/236-Lindzen-Choi-2011.pdf; 21.11.2019].

- Bei der Klimasensitivität geht es längst nicht mehr um eine CO₂-Verdopplung als bloßes Gedankenexperiment. Mit derzeit 415 ppm ist die Verdopplung bereits zu 48 % real passiert!
- Zugleich wurde 1 °C globale Erwärmung gegenüber vorindustriellem Niveau ermittelt (mit einer wahrscheinlichen Bandbreite von 0,8 °C bis 1,2 °C).¹⁰⁴ Und der tatsächliche Zusammenhang zwischen steigender Treibhausgaskonzentration und globaler Erwärmung wurde nachgewiesen.
- Es ist unstrittig, dass das Klima wegen der Wärmekapazität der Ozeane träge reagiert. Deshalb kann es als sicher gelten, dass noch weitere Erwärmung als Folge der jetzt schon erreichten Treibhausgaskonzentration bevorsteht, die der IPCC mit einem Wert unter 0,5 °C abschätzt.¹⁰⁵
- Wenn sich aber bei 48 % CO₂-Verdopplung bereits 1 Grad globale Erwärmung eingestellt hat und wegen der Trägheit des Systems noch zusätzliche Erwärmung bevorsteht, dann kann der wirkliche Wert der Klimasensitivität (d. h. bei 100 % Verdopplung) wohl nicht unter 1,5 Grad liegen!

Manche Wissenschaftler sehen zwar Gründe, die Klimasensitivität in der Nähe von 1 oder gar darunter anzunehmen (dann hätten wir kein Problem und die Ziele des Pariser Abkommens wären wie von selbst erfüllt). Doch solche Annahmen – so berechtigt sie aus dem jeweiligen wissenschaftlichen Blickwinkel erscheinen mögen – gehen seltsam an der soeben geschilderten Realität vorbei. Somit ist klar: Ein Wert der Klimasensitivität unter 1,5 ist *nicht plausibel*, falls die globale Erwärmung hauptsächlich durch die Erhöhung der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentration verursacht ist.

Was aber, wenn dieses „hauptsächlich“ einen geringeren Anteil ausmacht als heute überwiegend angenommen? Weil möglicherweise natürliche Phänomene eine Rolle spielen, die wir derzeit noch nicht verstanden haben? R. W. Spencer geht von einem Szenario aus, in welchem nur 70 % der Erwärmung der letzten 150 Jahre anthropogenen Ursprungs sind. Er gibt den Wert der Gleichgewichts-Klimasensitivität bei 1,3 °C an, weil die mögliche Klimawirkung der Sonne in den meisten Berechnungen der Klimasensitivität nach seiner Auffassung nicht ausreichend berücksichtigt wird.¹⁰⁶ Mal ganz abgesehen vom wissenschaftlichen Für und Wider: falls das stimmen würde – erwächst uns daraus Entlastung?

Leider nicht! Die globale Erwärmung findet auch dann zu 100 % statt, wenn wir Menschen sie nur zu 70 % verursachen. Der Wert der Klimasensitivität wäre in diesem Falle zwar niedriger, doch wir müssten nun erstrecht auf den menschlich verursachten Anteil Einfluss nehmen. Denn auf den natürlich verursachten haben wir keinen Einfluss.

¹⁰⁴ IPCC, Klimaänderung 2013, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, S. 8.

¹⁰⁵ IPCC Sonderbericht „1,5 °C globale Erwärmung“ 2018, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, S. 9.

¹⁰⁶ [www.drroyspencer.com/2018/02/diagnosing-climate-sensitivity-assuming-some-natural-warming/; 21.11.2019].

Zwischenbilanz:

- Viele Wechselwirkungen und Rückkopplungen sind nicht ausreichend bekannt oder wegen ihrer Komplexität in den Modellen nicht explizit darstellbar, sie werden daher durch vereinfachende Parameter oder teilweise gar nicht abgebildet. Das führt zu Unsicherheiten.
- Insbesondere lässt sich auch der Wert der Klimasensitivität nicht genau bestimmen. Die Annahme des IPCC liegt zwischen 1,5 und 4,5 °C globale Erwärmung bei CO₂-Verdopplung, andere Annahmen der Forscher liegen niedriger (und manche auch höher).
- Ungeachtet dieser großen Bandweite ist anhand der bereits eingetretenen Folgen ein niedriger Wert der Klimasensitivität nicht mehr plausibel. Es ist somit klar, dass die Emission von Treibhausgasen gesenkt werden muss.
- Sollten zusätzlich zur anthropogenen Ursache in erheblichem Maße natürliche Ursachen an der globalen Erwärmung mitwirken, würde das zwar den Wert der Klimasensitivität mindern, nicht aber das Ausmaß der tatsächliche Erwärmung. Auch in diesem Fall müssen die CO₂-Emissionen gesenkt werden.



Hawaii, tropischer Regenwald

10. Fazit

Wir fassen noch einmal zusammen:

- *Der CO₂-Anteil in der Atmosphäre ist nichtlinear und in einem seit 800.000 Jahren nie dagewesenem Ausmaß auf 415 ppm gestiegen (Stand 2019). Nach derzeitigem Kenntnisstand zum Kohlenstoffkreislauf wird dieser fortwährende Anstieg durch die gleichfalls fortwährende anthropogene CO₂-Emission verursacht. Das zusätzliche CO₂ wird teils von Pflanzen aufgenommen und teils von Wasser, 45 % aber werden in der Atmosphäre angesammelt: Jahr für Jahr.*
- *Die atmosphärische Konzentration weiterer Treibhausgase (Methan, Lachgas usw.) ist ebenfalls stark angestiegen. Das CO₂-Äquivalent aller Treibhausgase zusammen betrug 2018 bereits 496 ppm. Auch das ist vom Menschen deutlich mitverursacht.*
- *415 ppm CO₂-Anteil in der Atmosphäre entsprechen bereits 48 % einer CO₂-Verdopplung gegenüber dem vorindustriellen Niveau. Zugleich ist in dieser Zeit 1 °C globale Erwärmung ermittelt worden.*
- *Das Ausmaß der Erwärmung fällt regional unterschiedlich aus, insgesamt besteht aber ein deutlicher globaler Trend. Folgephänomene wie Niederschlags-Veränderungen oder Dürren lassen sich im Einzelfall nicht gesichert auf die globale Erwärmung zurückführen, jedoch steigt deren Wahrscheinlichkeit.*
- *Der Meeresspiegel ist seit 1875 um 25 cm gestiegen; der Anstieg der letzten Jahrzehnte ist als Folge der globalen Erwärmung erklärbar.*

Bis hier hin handelt es sich nicht um irgendwelche Vermutungen, sondern um Fakten: um Mittelwerte auf der Grundlage tatsächlicher Messwerte oder Proxydaten. Nun folgen Anzeichen zur fraglichen Ursache:

- *Auf Grund der stetig steigenden Konzentration infrarotaktiver Spurengase steigt naturgemäß deren Klimawirkung. Mittlerweile ist durch die Auswertung von Differenzspektren nachgewiesen worden, dass eine Abnahme der Infrarotabstrahlung der Atmosphäre im Bereich der Absorptionsbanden von CO₂, Methan usw. stattgefunden hat – und zwar genau in dem Zeitraum, in dem die Konzentration dieser Treibhausgase zugenommen hat. Das ist ein deutlicher Hinweis auf ihre Klimawirksamkeit.*
- *Da die wachsende Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre überwiegend auf anthropogene Emissionen zurückgeht, ist der genannte Nachweis zugleich ein klarer Hinweis darauf, dass die globale Erwärmung hauptsächlich durch Menschen verursacht ist.*
- *Klimamodelle, welche die reale Temperaturentwicklung der Vergangenheit nachbilden, rechnen nur dann fehlerfrei, wenn neben natürlichen Einflüssen auch die menschengemachte Treibhausgas-Emission in die Betrachtung einbezogen wird. Das ist ein weiterer Hinweis darauf, dass der Klima-Einfluss des Menschen spätestens seit Ende der 1970er Jahre an Bedeutung gewonnen hat; mit natürlichen Einflüssen allein ist die globale Temperaturentwicklung nicht mehr zu erklären.*

Diese Anzeichen ermöglichen keine absolut sicheren Erkenntnisse, aber hochwahrscheinliche Auffassungen. Vermutlich wird unser Wissen im Laufe der Zeit verbessert, qualifiziert und korrigiert werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch ist dies der Wissensstand, mit dem sich die real gegenwärtigen Phänomene beschreiben lassen.

Modellrechnungen zur Projektion künftiger Auswirkungen sind naturgemäß schwierig. Obwohl die Modelle an der Berechnung vergangener und gegenwärtiger Zustände erprobt sind, können sie die Zukunft nicht sicher vorhersagen. Das Ergebnis hängt deutlich von vorausgesetzten gesellschaftlichen Szenarien sowie von derzeit noch schwer wägbaren Annahmen zu Wechselwirkungen und Rückkopplungen ab. Damit ergibt sich ein Spielraum bei den Resultaten.

Für die Glaubwürdigkeit der Modelle ist der Wert der Klimasensitivität (Kennzahl der erwarteten globalen Erwärmung bei Verdopplung der atmosphärischen CO₂-Konzentration) von großer Bedeutung. Doch die Annahmen zu diesem Wert weisen nach IPCC derzeit eine Bandbreite zwischen 1,5 und 4,5 °C auf. Die bestehenden Unwägbarkeiten lassen keine genauere Bestimmung zu. Zugleich zeigt die simple und wohl einleuchtende Abschätzung am Ende von 9., dass allein schon aus der bisherigen realen Entwicklung eine globale Erwärmung von deutlich mehr als 1 °C zu erwarten ist – und da ist noch keine künftige Emission und keine bevorstehende Rückkopplungsverstärkung dabei. Das bedeutet: Wir müssen die Treibhausgas-Emissionen schnellstens reduzieren.

Selbstverständlich führen die aufgezeigten Unwägbarkeiten zu öffentlicher Skepsis und Diskussion, das ist nur natürlich. Doch es ist an der Zeit, das Lagerdenken und die Polarisierung in der öffentlichen Klimadebatte zu überwinden. Niemand bestreitet einen Anteil natürlicher Ursachen am Klimawandel. Zugleich ist doch aber die Klimawirksamkeit der von Menschen verursachten Treibhausgas-Emission nachgewiesen. Nochmals: Wir haben jetzt schon 1 °C globale Erwärmung plus einem noch ausstehenden Anteil. Und wir sind gut beraten, die weitere Erwärmung zu begrenzen: Während der letzten Warmzeit lagen die Sommertemperaturen auf der Nordhemisphäre um nur knapp 2 °C oberhalb des vorindustriellen Temperaturniveaus – bei 4 bis 6 Meter höherem Meeresspiegel!

Die Ursachen der natürlichen Klimaschwankungen sind noch nicht restlos verstanden, ebenso ist unser Wissen über die hochkomplexen atmosphärischen Vorgänge verbesserungsfähig. Man kann deshalb mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit das Ausmaß des menschenverursachten Anteils am Klimawandel für geringer halten als vom IPCC derzeit angenommen. Doch das ändert nichts. Wir müssen, wollen wir uns verantwortungsbewusst verhalten, der „schlechten Prognose“ den Vorrang geben (H. Jonas), statt einfach auf den günstigsten Fall zu hoffen. Wir müssen auch dann die globale Erwärmung zu begrenzen versuchen, wenn unser Anteil an der Ursache bspw. bei nur 70 % liegen sollte. Und wir müssen doch ohnehin unter dem Aspekt schwindender Ressourcen und der Störung weiterer Ökosysteme zu einem maßvollen Rückgang von Produktion und Konsum finden. Genau das geht aber selbstverständlich mit einer Verminderung der CO₂-Emission einher, denn 81 % der weltweit eingesetzten Primärenergieträger sind aktuell noch immer fossil! Verminderung der CO₂-Emission: Was an diesem Ziel wäre so falsch, dass man dagegen sein müsste?

Empfohlen zur Vertiefung:

Informationsportal Klimawandel der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG:
www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel

C. Buchal, C. D. Schönwiese: Klima, Hrsg. Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung 2010
Download: www.boensel-ess-darmstadt.de/files/Ph_Q3/klima_2011-heraeus.pdf

Umweltbundesamt: Und sie erwärmt sich doch
Download: www.umweltbundesamt.de/publikationen/sie-erwaermt-sich-doch-was-steckt-hinter-debatte-um

Internetseite „Regionale Klimaänderungen“
www.reklim.de