

Globale Erwärmung

Dass es auf der Erde seit einigen Jahrzehnten ständig wärmer wird, und dass diese Erwärmung einen Klimawandel zur Folge hat, ist unübersehbar. Aber was *genau* geht da vor? Was ist die Ursache der permanenten Erwärmung, und welche Folgen hat sie? Umfassende Informationen zu allen Aspekten des Klimawandels auf höchstem wissenschaftlichen Niveau sind in den Reports¹ des IPCC² jederzeit verfügbar.

Aber die Lektüre dieser Reports ist überaus mühsam. Deshalb habe ich in diesem File die wichtigsten Informationen zum Klimawandel auf

nur 35 Seiten zusammengestellt und so aufbereitet dass ich sie verstehen kann, nach der Devise: „Wenn ich das verstehe, dann wird es jeder andere halbwegs intelligente Zeitgenosse auch verstehen.“ Die Informationen stammen sowohl aus den Reports des IPCC als auch aus vielen anderen Quellen, die ich im Netz gefunden habe. Selbstverständlich habe ich Links zu allen diesen Quellen eingefügt, so dass Leser, die sich über diesen oder jenen Punkt genauer und aus erster Hand informieren möchten, mit wenigen Mausklicks darauf Zugriff haben.

¹ Man kann die Reports des IPCC hier herunterladen: <https://www.ipcc.ch/>

² Der Weltklimarat (IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change) wurde 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP = United Nations Environmental Program) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO = World Meteorological Organization) als eine neue Institution der Vereinten Nationen gegründet. Zurzeit (2025) sind 195 Länder Mitglieder des IPCC.

Im Auftrag des IPCC tragen Wissenschaftler den aktuellen Stand der Klimaforschung zusammen und bewerten den jeweils neuesten Kenntnisstand zum Klimawandel. Das IPCC soll Grundlagen für wissenschaftsbasierte Entscheidungen der Politik und unterschiedliche Handlungsoptionen und deren Implikationen aufzeigen, ohne jedoch politische Empfehlungen zu geben.

1. Messergebnisse

1.1 Temperatur

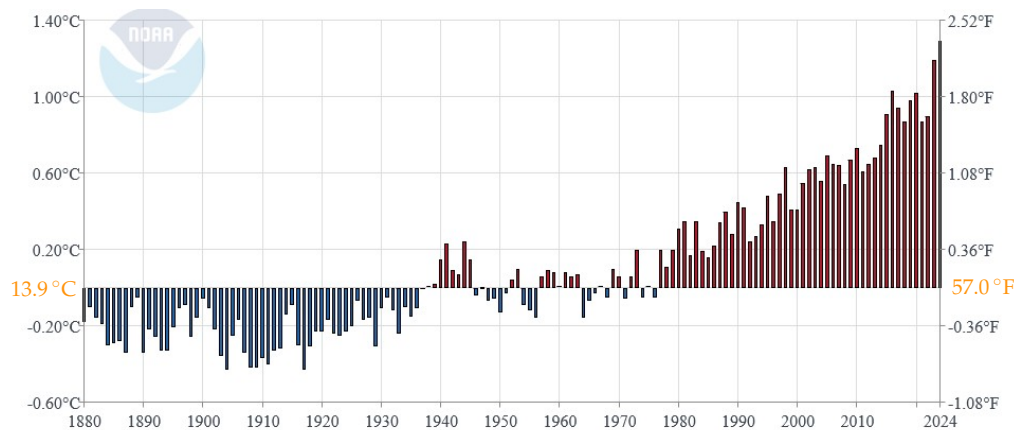


Abb. 1: Oberflächentemperatur, Globaler Jahresmittelwert von Meer und Land. Grafik aus [1].

Die Oberflächentemperatur der Erde, gemittelt über Meere und Landflächen, lag im Mittel des 20. Jahrhunderts bei $13,9^{\circ}\text{C} = 57,0^{\circ}\text{F}$. In Abb. 1 sind für die Jahre 1880 bis 2024 die Abweichungen von diesem Referenzwert eingetragen.

Die elf Jahre 2014 bis 2024 waren die elf wärmsten seit dem Beginn regelmäßiger Temperaturmessungen. Bisheriges Rekordjahr war 2024 mit $1,29^{\circ}\text{C}$ über dem Mittelwert des 20. Jahrhunderts.

1.2 Schmelzendes Eis

Die Ausdehnung und Mächtigkeit des Eises von 41 repräsentativen Gebirgsgletschern ([Liste hier](#)) in mehreren Kontinenten wird seit Jahrzehnten systematisch beobachtet. Zwar gibt es immer wieder Eiszuwächse, der allgemeine Trend geht aber überall deutlich nach unten.

In Abb. 2 ist der kumulative Eisverlust eingetragen, den die beobachteten Gletscher in der jeweiligen Region im Mittel erlitten haben. Als Nullpunkt wurde bei allen Kurven die Eismasse von 1976 festgelegt. Die beiden Einheiten

m w.e. = meter water equivalent

$1000 \text{ kg m}^{-2} = \text{t m}^{-2} = \text{tons per square meter}$

bedeuten das gleiche: Man misst – oder schätzt ab – wieviel Schmelzwasser aus dem Gletscher abgefließen ist, und teilt das Gewicht dieser Wassermenge durch die Fläche des Gletschers.

Ein Kubikmeter Eis ergibt weniger als einen Kubikmeter Schmelzwasser, aber nicht viel weniger (nur die Spitze des Eisbergs ragt über die Meeresoberfläche). Man kann also aus der Kurve für Central Europe (= Alpengletscher) grob abschätzen, dass ein Bergsteiger, der vom Gletscher zur Hütte aufsteigt, jedes Jahr etwa einen Höhenmeter mehr bewältigen muss,³ siehe auch Abb. 3 auf der nächsten Seite.

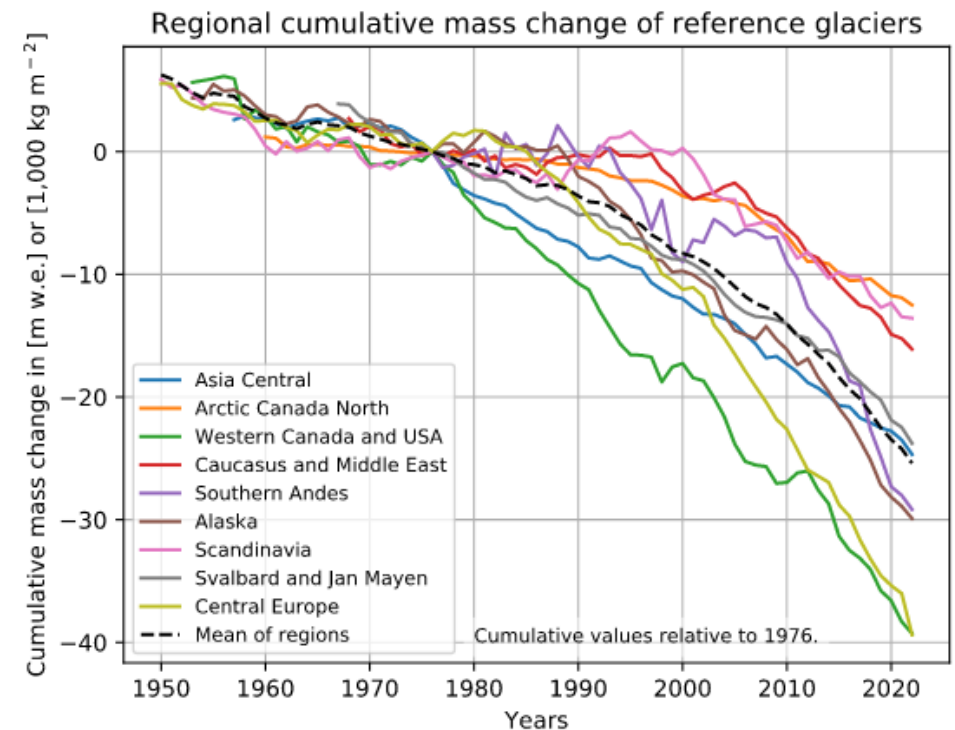


Abb. 2: Eisverlust von 41 Gebirgsgletschern. Grafik aus [2].

³ Also macht eure Touren bald! Je länger ihr zögert, desto anstrengender wird es.

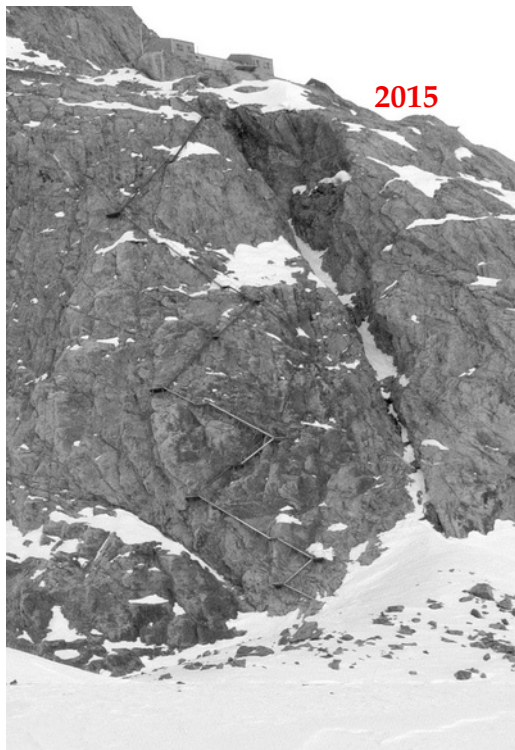


Abb. 3: Die Konkordiahütte über dem Aletschgletscher (Berner Alpen, Schweiz) gegen 1880 and im März 2015.

In den Jahren 2002 bis 2015 wurde das Gravitationsfeld der Erde mithilfe der beiden GRACE Satelliten mit einer bis dahin ungekannten Präzision vermessen. Das Prinzip der Messung war folgendes:

Die beiden Satelliten überflogen in jedem Jahr dutzende male in 450 bis 500 km Höhe sämtliche Winkel der Erde. Die beiden Satelliten flogen auf der gleichen Bahn hintereinander her, der Abstand zwischen ihnen betrug stets etwa 220 km. Jeder der beiden Satelliten hatte ein spezielles Radarsystem an Bord, mit dem er Änderungen des Abstands zu seinem Zwilling jederzeit auf 10 μm genau überwachte.^{20;4}

Wenn die Satelliten sich einer Stelle der Erde mit überdurchschnittlicher Masse näherten, dann wurde aufgrund der erhöhten Gravitation zunächst der erste Satellit beschleunigt, und erst etwas später der zweite, d. h. der Abstand zwischen den Satelliten wurde größer. Wenn die Satelliten über den Bereich mit hoher Masse hinweggeflogen waren, dann wurde zuerst der vorausfliegende Satellit gebremst, und erst etwas spä-

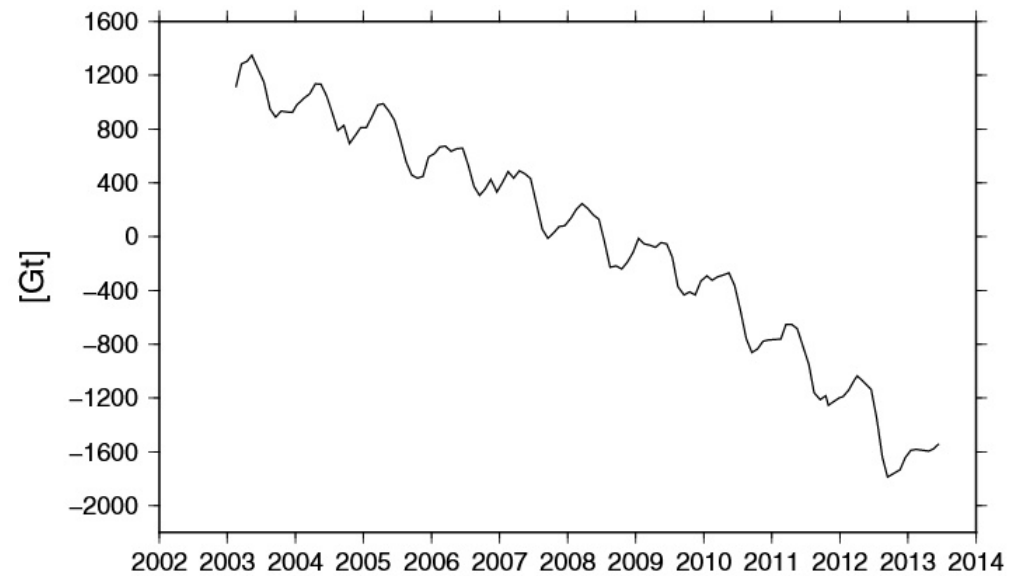


Abb. 4: Eisverlust von Grönland, berechnet aus GRACE Daten.

Grafik aus [3].

ter der zweite, d. h. der Abstand zwischen den Satelliten wurde wieder kleiner. Der variierende Abstand zwischen den Satelliten war also ein Indikator für das variierende Gravitationsfeld der Erde.

Wenn Gletscher oder die vereisten Polkappen der Erde abschmelzen, dann verteilt sich das Schmelzwasser über die Weltmeere. Also nimmt die Gravitation dort, wo das Eis verschwindet, ab. Das konnte mit den GRACE-Satelliten tatsächlich beobachtet werden.

In Abb. 4 ist die aus den GRACE Daten berechnete Abnahme des Eispanzers von Grönland in Einheiten von Gt = Giga-Tonnen = Milliarden Tonnen dargestellt (der Nullpunkt der vertikalen Skala ist beliebig gewählt). Ähnliche Kurven berechneten die Autoren von [3] auch für die Antarktis und für alle anderen Eisgebiete der Erde, und leiteten davon diese Ergebnisse ab:

	Masseverlust
Grönland	(278 ± 19) Gt/Jahr
Antarktis	(92 ± 26) Gt/Jahr
alle anderen Eisgebiete	(162 ± 10) Gt/Jahr
Summe	(532 ± 34) Gt/Jahr

⁴ Kein Druckfehler, sondern ein Wunderwerk der Technik!

Die Autoren merken an, dass die Schmelze von 532 Gt Eis pro Jahr in etwa die Hälfte des beobachteten globalen Anstiegs des Meeresspiegels erklären kann.

Qualitativ sind diese Ergebnisse sicher richtig, aber was die genauen Zahlenwerte angeht muss man sie mit einer gewissen Vorsicht betrachten. Denn die GRACE-Satelliten meldeten ja nur die auf $10\ \mu\text{m}$ genau gemessenen Änderungen des Abstands zu ihrem Zwilling, und ihre – mithilfe der GPS-Satelliten ermittelte – Position über der Erde, sonst nichts. Um aus diesen beiden Daten zu berechnen wieviel Eis wo auf der Erde lastet braucht man nicht nur eine Menge Computerpower, sondern man muss auch eine Reihe von Modell-Annahmen machen, die unter Experten durchaus nicht unstrittig sind.

Einer der schwer fassbaren Einflussfaktoren heißt im Slang der Geophysiker „Glacial Isostatic Adjustment“. In Abb. 5 ist skizziert, worum es sich dabei handelt: Die Erde ist keine starre Kugel, sondern sie kann sich plastisch verformen. Das gilt insbesondere für den äußeren Teil des Erdmantels, auf dem die etwa 30 bis 60 km dicke Erdkruste (Lithosphäre) lagert. Wenn der Eisanspanzer, der auf Grönland lastet, pro Jahr um mehrere hundert Gigatonnen leichter wird, dann wird sich der Boden unter dem Eisschild langsam heben. Qualitativ ist das klar, aber um die GRACE Daten interpretieren zu können, muss man eine quantitative Annahme machen, und da tun sich die Geophysiker schwer.

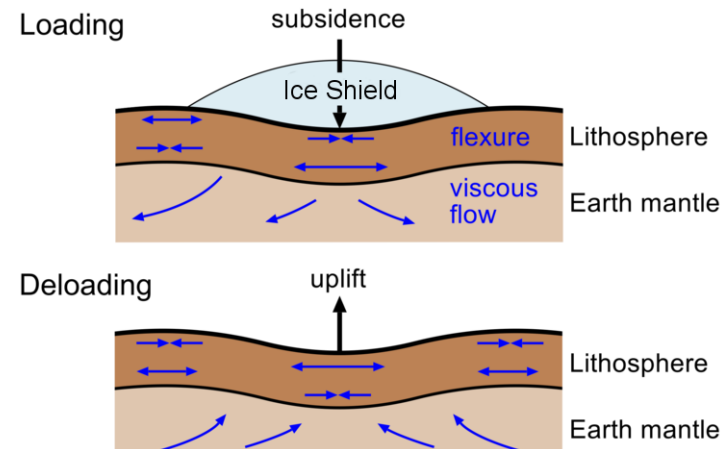


Abb. 5: Glacial Isostatic Adjustment. Grafik aus [4].

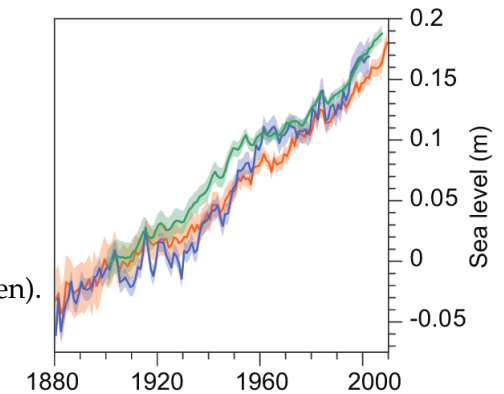
1.3 Anstieg des Meeresspiegels

Die Höhe des Meeresspiegels wird seit dem 18. Jahrhundert auf der Nordhalbkugel mit Pegeln an den Häfen gemessen, seit dem späten 19. Jahrhundert auch auf der Südhalbkugel. Erst vor wenigen Jahrzehnten ist die Messung mithilfe von Satelliten hinzugekommen. Die beiden Methoden messen nicht genau das Gleiche: Pegel messen die Höhendifferenz zwischen einem festen Punkt an der Küste, und dem Meeresspiegel. Satelliten messen dagegen den Abstand zwischen dem Meeresspiegel und ihrer Flugbahn, die wiederum einen bekannten Abstand vom Erdmittelpunkt hat; die Messung mit Satelliten wird deshalb auch geozentrische Messung genannt.

In Abb. 6 sind die Mittelwerte weltweit verteilter Pegelmessungen von 1880 bis 2010 eingetragen. Die Mittelung wurde mit drei verschiedenen Methoden⁵ durchgeführt, deshalb gibt es drei Kurven mit jeweils schattiert angedeuteten Unsicherheiten. Im großen und ganzen ist das Ergebnis aber eindeutig: Im weltweiten Mittel stiegen die Pegel in diesen 130 Jahren um 29 cm, also im Schnitt um

+2,2 mm/Jahr.

Abb. 6: Globaler Mittelwert des Meeresspiegels (Pegel-Messungen). Grafik aus [5, Chapter 13].



Wenn die Weltmeere ruhige Teiche wären, dann würde sich schnell überall ein gleichmäßig hoher Meeresspiegel einstellen. Das sind sie aber nicht. Die lokal sehr unterschiedliche Sonneneinstrahlung, schmelzendes Eis, die geringere Dichte von wärmerem Wasser, die höhere Dichte von salzigerem Wasser, die Gezeiten (bewirkt durch den gravitativen Einfluss von Mond und Sonne), unterschiedliche Tiefe der Meere, unterschiedliche Küstenformen, Stürme, und viele weitere Einflüsse, setzen gewaltige Strömungen in Gang, die wiederum regional unterschiedlich hohe Meeresspiegel bewirken.

⁵ Natürlich muss man bei der Berechnung des Mittelwerts die einzelnen Pegel unterschiedlich gewichten, weil z. B. ein Pegel am Pazifik viel mehr Wasseroberfläche repräsentiert als ein Pegel an der Ostsee. Aber wie man die Gewichtung im einzelnen wählt, ist nicht von vorneherein eindeutig. Deshalb gibt es in Abb. 6 verschiedene Kurven mit verschiedenen geschummert eingetragenen Unsicherheitsbereichen, obwohl alle Kurven auf den gleichen Basisdaten beruhen.

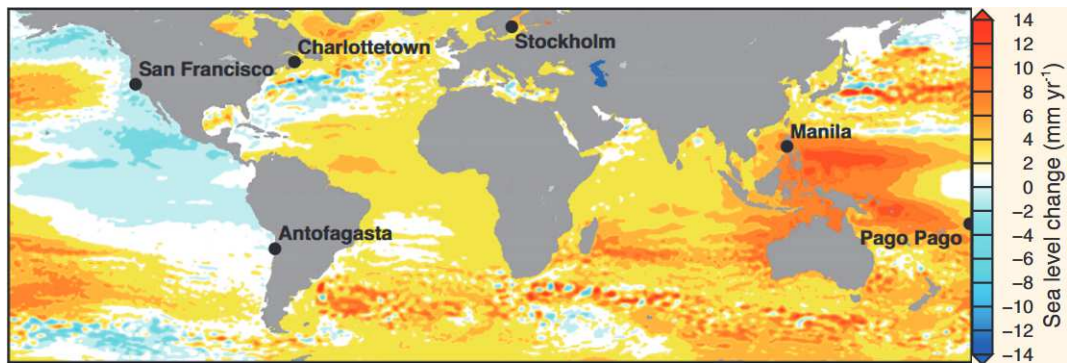


Abb. 7: Änderungsrate des Geozentrischen Meeresspiegels 1993–2012.
Grafik aus [5, Chapter 13].

Die aus Satellitenmessungen der Jahre 1993–2012 abgeleiteten Änderungsraten des Geozentrischen Meeresspiegels werden in Abb. 7 durch Farben repräsentiert. Dies Ergebnis ist gut verträglich mit dem aus den Pegelmessungen abgeleiteten globalen Mittelwert von etwa +2 mm/Jahr, aber offensichtlich gab es im Beobachtungszeitraum sehr große regionale Unterschiede. Im östlichen Pazifik, an der Westküste beider Amerika, sank der Meeresspiegel sogar, während er nirgendwo sonst so rasant anstieg wie im westlichen Pazifik, nördlich und östlich von Indonesien.⁶

Überlagert wird dies Ergebnis durch zahllose lokale Sondereffekte,

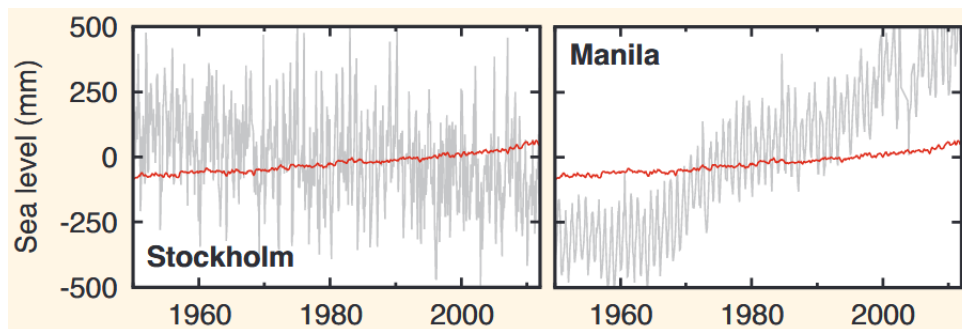


Abb. 8: Lokaler Pegel (grau) und Globaler Mittelwert (rot) des Meeresspiegels. Grafik aus [5, Chapter 13].

für die in Abb. 8 zwei Beispiele gezeigt werden. In Stockholm sank der mittlere Pegel langsam, aber stetig, obwohl die Ostsee in Abb. 7 gelb eingefärbt ist, der Anstieg des Geozentrischen Meeresspiegels dort also in etwa der roten Linie entsprach. Die Autoren von [5, Chapter 13] erklären das so: Skandinavien war während der letzten Eiszeit, die vor 8 000 Jahren endete, 12 000 Jahre lang von einem etwa 1 km dicken Eispanser bedeckt. Als dieser abschmolz, begann das Land sich zu heben wie in Abb. 5 skizziert, und diese Hebung dauert bis heute an. Der Stockholmer Pegel fiel also nicht deshalb, weil der Meeresspiegel sank, sondern weil das Land sich hob.

An der Küste der Philippinen stieg laut Abb. 7 der Geozentrische Meeresspiegel schnell an, aber der Pegel von Manila stieg noch deutlich schneller. Erklärung laut [5, Chapter 13]: Dort wird exzessiv Grundwasser gefördert, was zur Senkung des Landes führte.

Natürlich kann man auch aus dem von Satelliten gemessenen Geozentrischen Meeresspiegel den Globalen Mittelwert bilden. Das ist in Abb. 9 geschehen. Man sieht dass sich die Geschwindigkeit des Anstiegs ständig beschleunigt; laut der hellblau eingezeichneten Trendlinie liegt sie

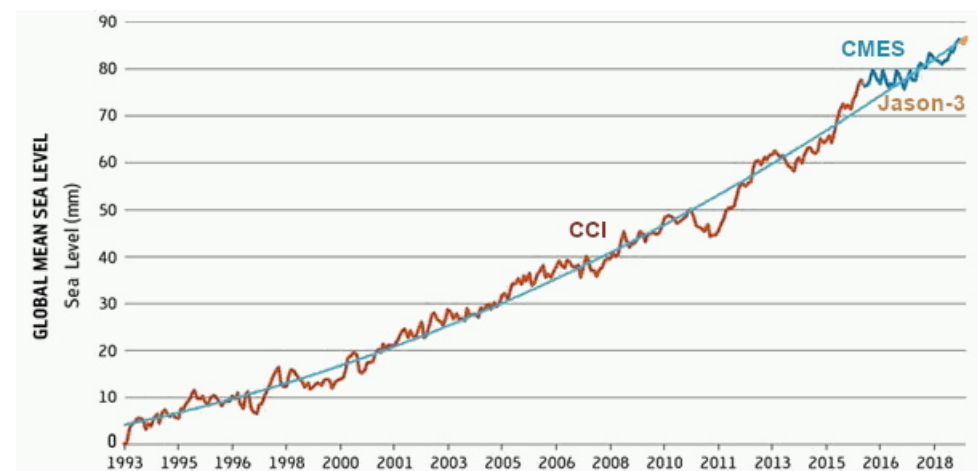


Abb. 9: Globales Mittel des Geozentrischen Meeresspiegels. Grafik aus [6].

⁶ Ein Sonderfall ist das Kaspische Meer, das keine Verbindung zu den Weltmeeren hat. Sein Wasserspiegel sank im Zeitraum 1993–2012 mit -14 mm/Jahr extrem schnell. In den vorangegangenen Jahrzehnten war er genau so extrem schnell gestiegen, und davor schon einmal extrem schnell gefallen. Auf eine Erklärung konnten sich die Fachleute bis heute nicht einigen.

inzwischen bei über 4 mm/Jahr . Allerdings hilft es beispielsweise den in ihrer Existenz bedrohten Inselstaaten im südlichen Pazifik wenig, dass der Anstieg des Meeresspiegels im globalen Mittel kleiner ist als lokal bei ihnen.

Erklärt wird der Anstieg des Meeresspiegels folgendermaßen [5, chapter 13, table 13.1]:

	Beitrag 1993–2010	%
Eisschmelze	1,46 mm/Jahr ⁷	50
Thermische Ausdehnung	1,1 mm/Jahr ⁷	37
Entnahme aus Grundwasser und Speicherseen	0,38 mm/Jahr ⁷	13
Summe	2,94 mm/Jahr	100
gemessener Anstieg	3,2 mm/Jahr	

Das Abschmelzen des Eises ist also für etwa 50 % des Anstiegs des Meeresspiegels verantwortlich. 37 % beruhen darauf, dass Wasser sich ausdehnt wenn es wärmer wird. Besonders erschreckend finde ich dass immerhin 13 % des Anstiegs des Meeresspiegels darauf zurückzuführen sind, dass die Menschheit mit den Süßwasservorräten dieses Planeten groben Raubbau betreibt.

1.4 Treibhausgase

In Abb. 10 sind in roter Farbe Messwerte der CO₂-Konzentration für mehrere Jahre eingetragen.⁸ Die Einheit ppm bedeutet parts per million, auf Deutsch: Teile pro Million, gemeint ist die Zahl der CO₂-Moleküle pro 1 Million aller Luftmoleküle. Es handelt sich um die Mittelwerte eines weltweit verteilten Netzes von Messstationen, das in Abb. 11 dargestellt ist. Man sieht deutlich einen Jahresgang: Die CO₂-Konzentration steigt an, wenn auf der Nordhalbkugel Winter ist, und sinkt wieder, wenn auf der Nordhalbkugel Sommer ist.⁹ Aber niemals auf den ursprünglichen Wert; vielmehr sind die Minimal- und Maximalwerte jedes Jahr ein bisschen höher als im Vorjahr.

⁷ Dies ist der Mittelwert mehrerer Berechnungen.

⁸ Die schwarzen Punkte sind gleitende Mittelwerte, die man getrost ignorieren kann.

⁹ Erklärung in Abschnitt 4.1

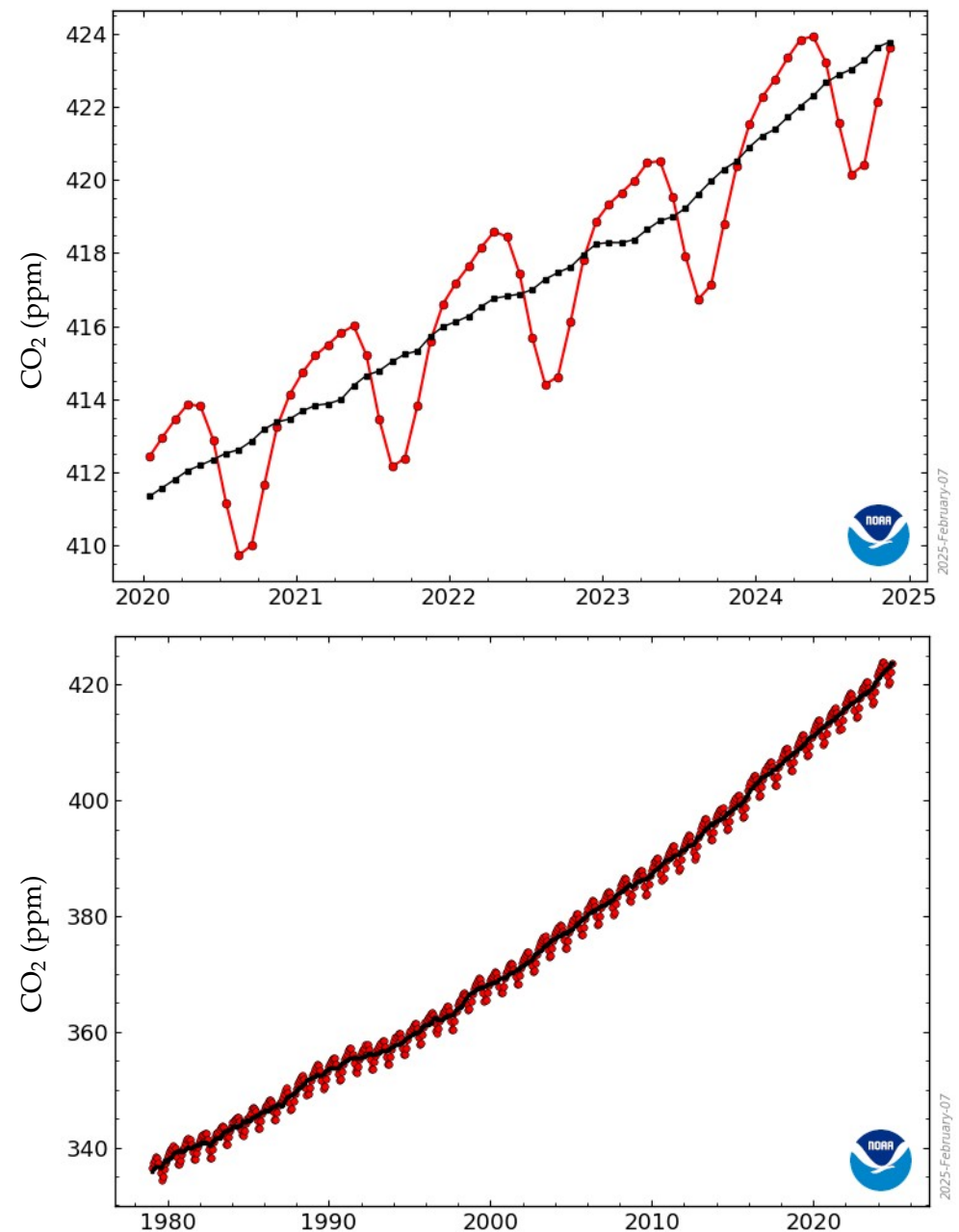


Abb. 10: Globaler Mittelwert der CO₂ Konzentration seit 2020 (oben) und seit 1980 (unten). Grafik aus [7].

Die globalen Mittelwerte der Konzentration von CH_4 sind als rote Punkte⁸ in Abb. 12 eingetragen, die globalen Mittelwerte der Konzentration von N_2O als rote Punkte⁸ in Abb. 13. Die Einheit ppb bedeutet parts per billion, auf Deutsch: Teile pro Milliarde, gemeint ist Zahl der CH_4 - bzw. N_2O -Moleküle pro 1 Milliarde aller Luftmoleküle.

Von 1999 bis 2006 blieb die CH_4 -Konzentration fast konstant, inzwischen steigt sie aber wieder so rasant an wie vor 1990. Der Anstieg der Konzentration von N_2O verläuft permanent ungebremst.

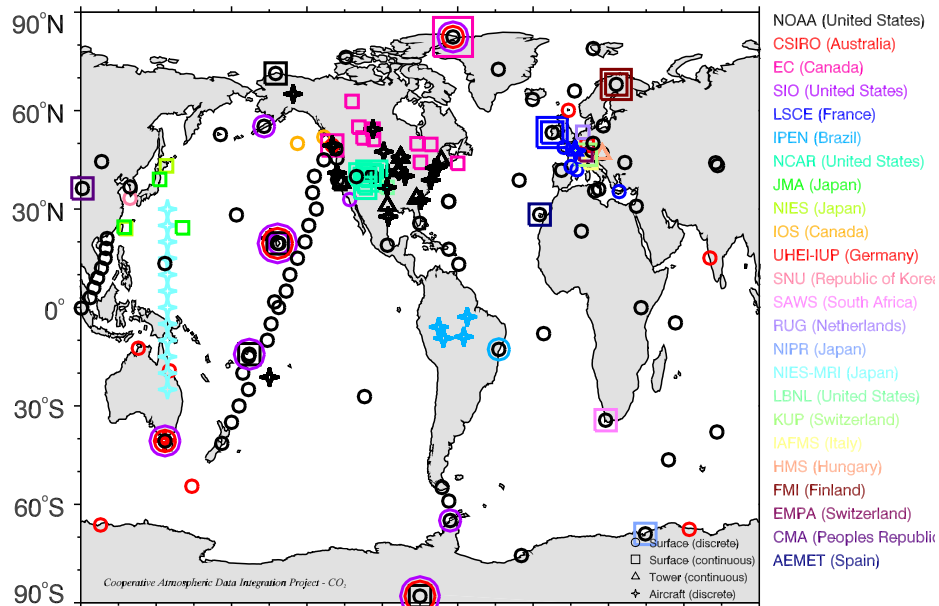
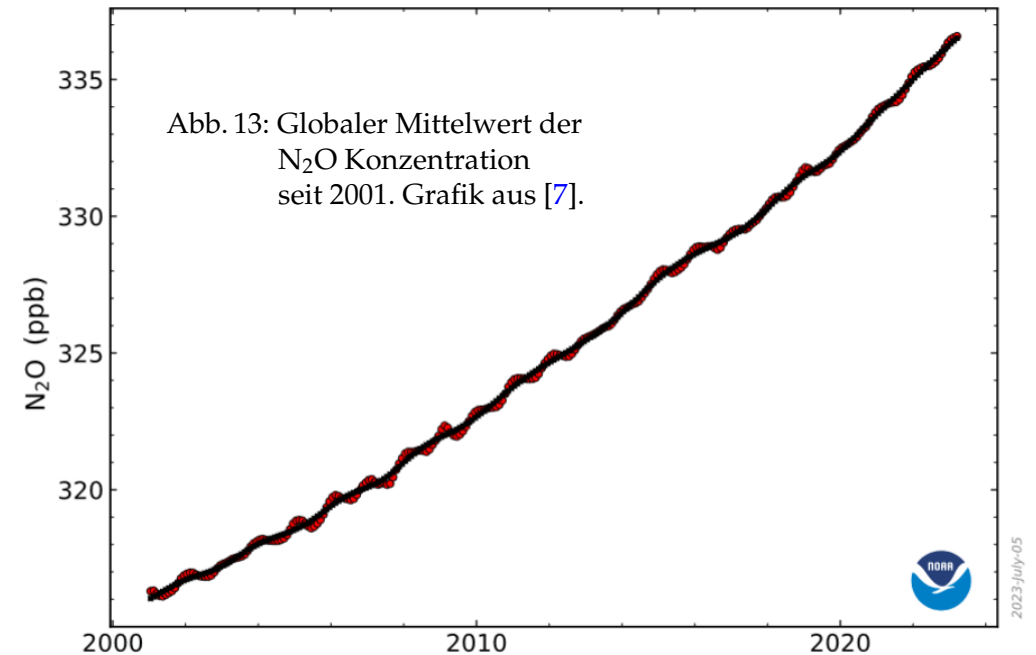
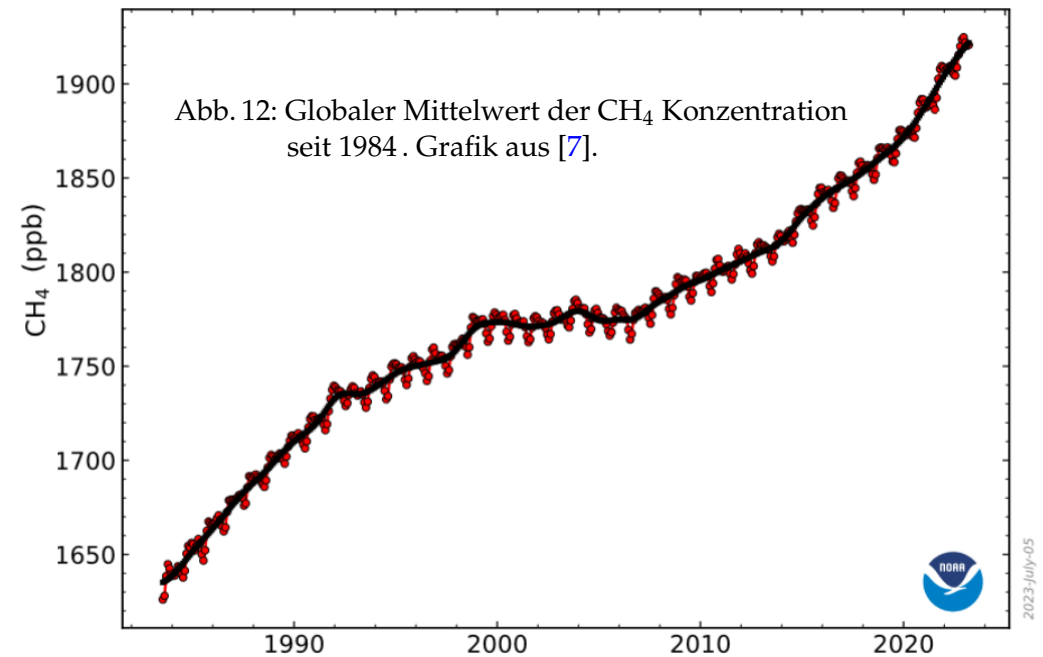


Abb. 11: Die Treibhausgas-Messstationen. Grafik aus [7].



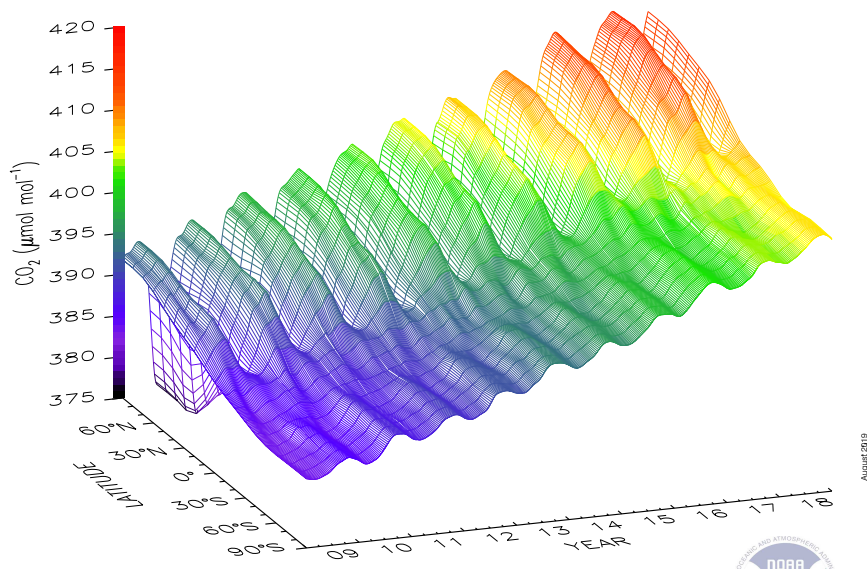


Abb. 14: Regionale Verteilung der CO_2 Konzentration in den Jahren 2009 bis 2018. Grafik aus [7].

Interessant ist die Verteilung der CO_2 -Konzentration auf die Nord- und Südhalbkugel der Erde, die man aus Abb. 14 ablesen kann. Der Unterschied zwischen Nord- und Südhalbkugel ist nicht so dramatisch groß wie man bei flüchtiger Betrachtung glauben könnte. Die vertikale Skala beginnt nicht bei Null, sondern bei 375 ppm. Der Unterschied zwischen Nord- und Südhalbkugel beträgt also nur knapp ein Prozent.

Trotzdem ist der Unterschied signifikant. Offensichtlich wird das CO_2 hauptsächlich auf der Nordhalbkugel in die Atmosphäre geblasen, und braucht dann 3 bis 4 Jahre um zur Südhalbkugel zu diffundieren. Das ist zweifellos ein wichtiges Indiz wenn man sich daran macht, nach der Ursache des CO_2 -Anstiegs zu suchen.

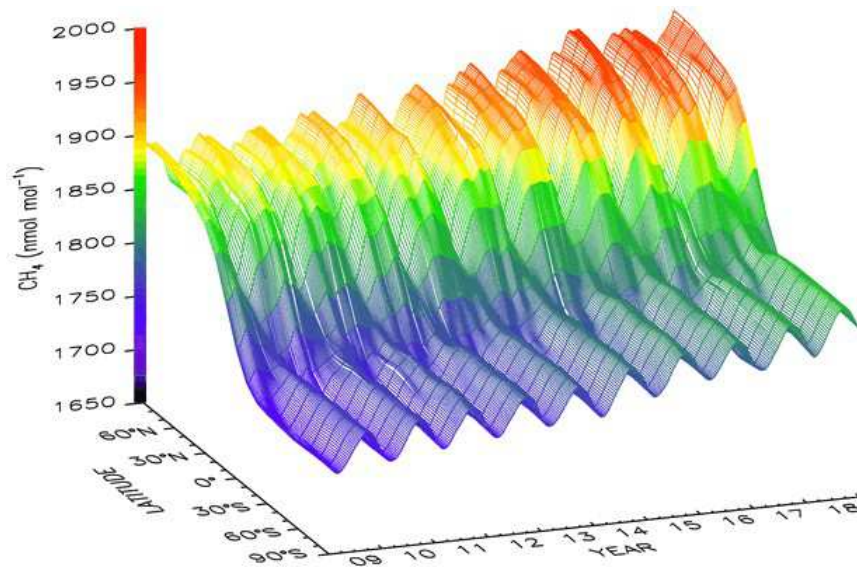


Abb. 15: Regionale Verteilung der CH_4 Konzentration in den Jahren 2009 bis 2018. Grafik aus [7].

In Abb. 15 sieht man, dass auch CH_4 hauptsächlich auf der Nordhalbkugel in die Luft geblasen wird. Es braucht dann Jahre — in diesem Fall deutlich mehr als zehn Jahre — um auf die Südhalbkugel zu diffundieren.



Abb. 16: Ein etwa 1 m langer Abschnitt eines Eisbohrkerns aus der GISP2 Bohrung in Grönland. Dieser Abschnitt stammt aus 1837 m Tiefe. Man erkennt deutlich die Jahresschichten.

Mithilfe von Eis-Bohr-Kernen kann man die Messung der Treibhausgase bis 800 000 Jahre in die Vergangenheit ausdehnen. Zu diesem Zweck werden mit Hohlkern-Bohrern in die Eispanzer von Grönland und der Antarktis Bohrungen bis in etwa 3,5 km Tiefe durchgeführt. In Abb. 16 ist ein Stück eines Eiskerns gezeigt, der auf diese Weise ans Tageslicht befördert wurde.

In den Poren des Eises sind die Gase in der Konzentration eingeschlossen, wie sie bei der Entstehung des Eises in der Atmosphäre vorhanden waren. In günstigen Fällen kann man aufgrund von Staub, der sich alljährlich auf der Eisfläche ablagert, leicht die Jahresschichten abzählen. In komplizierteren Fällen gelingt die Datierung mit anderen Methoden.

Zur Analyse zersägt man die Eiskerne in kleine Stücke, schmilzt sie auf, und analysiert mithilfe eines Massenspektrometers Art und Konzentration der Gase, die in den Poren des Eises eingeschlossen waren.

Die Ergebnisse sind in Abb. 17 dargestellt. Aus der Analyse dieser Messwerte, und der in den Abbildungen 10, 12, und 13 dargestellten Messwerte, ziehen die Autoren des IPCC-Reports AR5 die folgenden Schlussfolgerungen [5, chap. 6]:

- * Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre ist heute um 30 % höher als jemals zuvor in den letzten 800 000 Jahren.
- * Die Konzentration von CH_4 in der Atmosphäre ist heute um 120 % höher als jemals zuvor in den letzten 800 000 Jahren.
- * Die Konzentration von N_2O in der Atmosphäre ist heute um 10 % höher als jemals zuvor in den letzten 800 000 Jahren.
- * Die Konzentrationen von CO_2 , CH_4 , und N_2O in der Atmosphäre steigen derzeit schneller an als jemals zuvor in den letzten 800 000 Jahren.

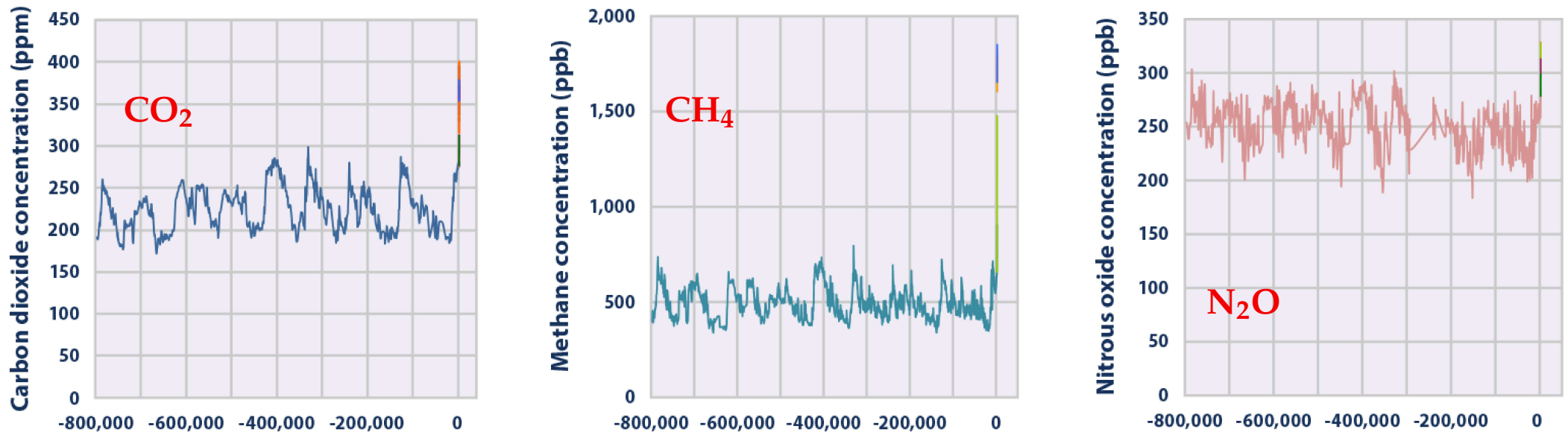


Abb. 17: Die Konzentrationen von CO_2 , CH_4 , und N_2O im Zeitraum -800 000 bis 2015. Die Messkurven bis 2015 sind jeweils ganz rechts in anderen Farben eingetragen. Grafik aus [8].

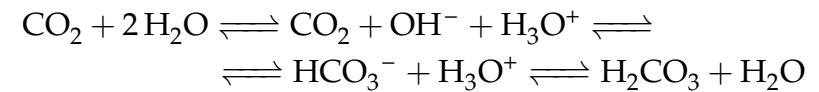
1.5 Wasserdampf ist ein Treibhausgas

(Text übernommen aus [8]:)

Wasserdampf ist das Treibhausgas, das in der Atmosphäre am häufigsten vorkommt. Die Aktivitäten von Menschen haben nur einen geringen direkten Einfluss auf die Konzentration von Wasserdampf in der Atmosphäre, hauptsächlich durch Bewässerung und das Abholzen von Wäldern. Der Temperaturanstieg, den Menschen durch die Produktion anderer Treibhausgase bewirken, führt jedoch zu einem Anstieg von atmosphärischem Wasserdampf, weil bei wärmerer Temperatur mehr Wasser verdampft und in Form von Wasserdampf in der Luft bleibt. Dies bewirkt eine positive „Rückkopplungs-Schleife“, in der ein Temperaturanstieg noch mehr Temperaturanstieg bewirkt.

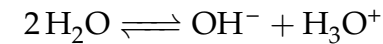
1.6 Versauerung der Meere

CO₂ ist wasserlöslich. Zwischen der Luft und dem Wasser von Meeren und Seen findet ein ständiger Austausch von CO₂ statt, der durch die chemische Formel



beschrieben werden kann. H₂CO₃ ist die Kohlensäure. Die Doppelpfeile sollen andeuten, dass die chemischen Reaktionen ständig in beiden Richtungen verlaufen. Ein „dynamisches Gleichgewicht“ hat sich eingestellt, wenn die Reaktion in der einen Richtung genau so häufig vorkommt wie die Reaktion in der umgekehrten Richtung.

H₃O⁺ Ionen kommen aufgrund der Reaktion



auch in reinem Wasser vor. Die Konzentration von H₃O⁺ Ionen im Wasser ist ein Maß für die Stärke wässriger Säuren und Laugen. Übliche Maßeinheit ist der pH-Wert (sprich: pe ha wert). Verwirrenderweise ist der pH-Wert um so kleiner, je größer die Konzentration von H₃O⁺ Ionen ist.¹⁰ Reines Wasser hat einen pH-Wert von 7, der pH-Wert von Säuren ist kleiner als 7, und der pH-Wert von Laugen ist größer als 7.

Meerwasser hat saure und alkalische Bestandteile. Die alkalischen überwiegen, so dass Meerwasser eine schwache Lauge ist. Wenn von der Versauerung des Meeres durch Kohlensäure gesprochen wird dann bedeutet das nicht, dass es zur Säure wird. Es bleibt eine Lauge, wird aber durch die Beimischung von Kohlensäure zu einer schwächeren Lauge. Sein pH-Wert wird kleiner, bleibt aber größer als 7.

Wenn die Konzentration von CO₂ in der Luft zunimmt, dann ist zu erwarten dass die Konzentration von Kohlensäure in den Gewässern ebenfalls zunimmt. Das ist tatsächlich der Fall. In Abb. 18 sind Ergebnisse von Messungen dargestellt, die in den Jahren 1988 bis 2007 auf der ozeanographischen Station ALOHA in Hawaii

¹⁰ Die genaue Definition: $\text{pH} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{\text{mol/Liter}}\right)$, wobei mit [H₃O⁺] die Konzentration von H₃O⁺ Ionen gemeint ist.

durchgeführt wurden. Nur die braunen Punkte beruhen auf der direkten chemischen Analyse des Meerwassers. Die grünen Punkte wurden indirekt aus Messungen anderer Parameter erschlossen.

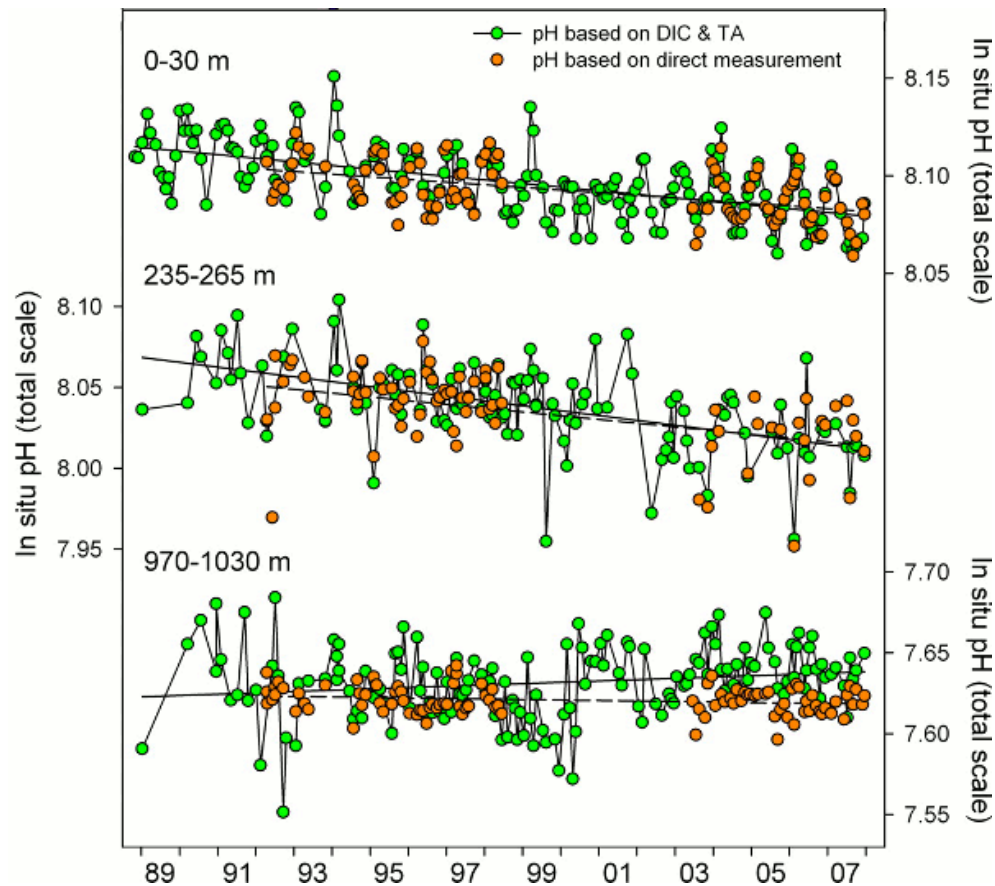


Abb. 18: pH-Werte in unterschiedlichen Meerestiefen. Station ALOHA, 1988–2007. Grafik aus [9].

Aus der statistischen Auswertung ihrer Messdaten berechneten die Autoren von Abb. 18 die Geschwindigkeit, mit der der pH-Wert in geringer und mittlerer Tiefe des Pazifik abnimmt, als

$$-0,0019 \pm 0,0002 \text{ pro Jahr.}$$

Pro 50 Jahre sinkt der pH-Wert also um $-0,1$. Das ist keineswegs wenig, sondern bedeutet eine Zunahme der Konzentration von H_3O^+ um 26 % in 50 Jahren!

In der Tiefsee wurde dieser Trend nicht beobachtet, hier führen die Meeresströmungen zu einem wesentlich komplizierteren Bild.

Die Versauerung bewirkt Änderungen im komplexen Ökosystem des Meeres, die in einem gut lesbaren Artikel [10, Abschnitt 3.4] des Umweltbundesamtes beschrieben werden. Eine wesentlich gründlichere Darstellung dieser Zusammenhänge findet man (in englischer Sprache) in einer Broschüre [11] der Convention on Biological Diversity der Vereinten Nationen.

Im Report SR15 des IPCC aus dem Jahr 2018 heißt es dazu: *The ocean has absorbed about 30 % of the anthropogenic carbon dioxide, resulting in ocean acidification and changes to carbonate chemistry that are unprecedented for at least the last 65 million years (high confidence¹¹). Risks have been identified for the survival, calcification, growth, development and abundance of a broad range of marine taxonomic groups, ranging from algae to fish, with substantial evidence of predictable trait-based sensitivities (high confidence¹¹). There are multiple lines of evidence that ocean warming and acidification corresponding to 1.5°C of global warming would impact a wide range of marine organisms and ecosystems, as well as sectors such as aquaculture and fisheries (high confidence¹¹). [12, chap. 3]*

¹¹ Die Autoren der IPCC-Reports kennzeichnen mit folgenden Begriffen, wie sie die Wahrscheinlichkeit oder Genauigkeit eines Resultats einschätzen: Virtually certain 99–100% probability, Extremely likely 95–100%, Very likely 90–100%, Likely oder Confidence level high 66–100%, About as likely as not 33–66%, Unlikely oder Confidence level low 0–33%, Very unlikely 0–10%, Extremely unlikely 0–5%, Exceptionally unlikely 0–1%, More likely than not >50–100%

2. Zusammenhänge

2.1 Die Strahlungsbilanz der Erde

Die Erde bewegt sich auf einer leicht elliptischen Bahn pro Jahr einmal um die Sonne. Am sonnennächsten Punkt der Erdbahn (dort befindet sich die Erde Anfang Januar) beträgt die Strahlungsleistung der Sonne etwa 1420 Watt pro Quadratmeter, dagegen nur etwa 1325 W/m^2 am sonnenfernsten Punkt der Erdbahn (dort befindet sich die Erde Anfang Juli).¹²

Die Sonne strahlt nicht immer gleich stark. Es gibt einen etwa 11-jährigen „Sonnenzyklus“, bei dem sich die Strahlungsleistung der Sonne allerdings nur um weniger als 0,1 % ändert. Gemittelt über den Sonnenzyklus und das Jahr ist die

$$\text{Strahlungsleistung der Sonne} = 1365 \text{ W/m}^2.$$

Die *durchschnittliche* Einstrahlung der Sonne pro Quadratmeter Erdoberfläche ist viel kleiner, weil die Sonne immer nur eine Seite der Erdkugel beleuchtet, und weil die Erde in der Nähe der Pole nur einen Streifschuss der Sonnenstrahlung abbekommt. Die Berechnung ist überraschend einfach: Die Oberfläche einer Kugel ist genau vier mal so groß wie ihre Querschnittsfläche. Deshalb ist die

$$\begin{aligned} \text{durchschnittliche Strahlungsleistung der Sonne} \\ \text{pro m}^2 \text{ Erdoberfläche} &= 1365 \text{ W} / 4 = 341,3 \text{ W}. \end{aligned}$$

Die Grafik Abb. 19 deutet an, dass die Atmosphäre für die Strahlungsbilanz der Erde eine wichtige Rolle spielt. Um das zu verstehen überlegt man sich am besten zunächst was geschehen würde, wenn die Erde keine Atmosphäre hätte: Dann würde die Erdoberfläche mit durchschnittlich $341,3 \text{ W/m}^2$ angestrahlt. Nach Abb. 19 werden davon etwa $23 / (23 + 161) \approx 13\%$ zurück in den Weltraum reflektiert; den Rest, also 299 W/m^2 , absorbiert die Erde, und wird dadurch erwärmt. Je wärmer die Erde wird, desto mehr Energie emittiert sie als infrarote Strahlung in den Weltraum. Das Gleichgewicht ist erreicht, wenn die Erde auf -18°C

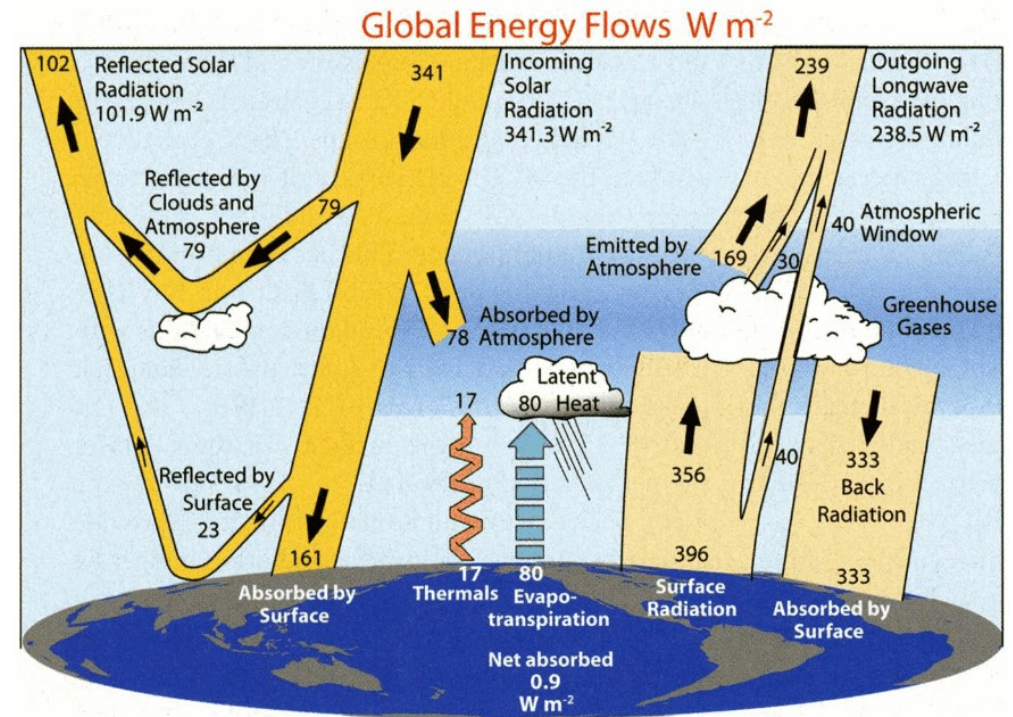


Abb. 19: Die Strahlungsbilanz der Erde. Grafik aus [13].

aufgeheizt ist; dann emittiert sie 299 W/m^2 als infrarote Strahlung in den Weltraum, also genauso viel Energie wie sie von der Sonne absorbiert. -18°C , das ist die Temperatur in einer Gefriertruhe.

Die tatsächliche durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde von $+15^\circ\text{C}$ stellt sich nur aufgrund des Treibhauseffekts der Atmosphäre ein. Einerseits wird fast die Hälfte der Sonnenstrahlung von der Atmosphäre reflektiert; dadurch wird die Erdtemperatur noch niedriger. Aber andererseits wird ein großer Teil der von der Erde emittierten infraroten Wärmestrahlung von der Atmosphäre zur Erde zurück reflektiert. Der zweite Effekt überwiegt, dadurch steigt die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde auf die bereits erwähnten $+15^\circ\text{C}$.

¹² Dass es bei uns trotzdem im Sommer wärmer ist als im Winter liegt daran dass die Sonne im Sommer zwar weiter weg ist, aber höher am Himmel steht. Erklärung in dieser [Grafik](#).

Zwei weitere Beiträge zur Energiebilanz der Erde werden in Abb. 19 nicht erwähnt, weil sie vernachlässigbar klein sind. Zum Einen der Wärmestrom aus dem heißen Erdinneren an die Oberfläche: Der beträgt nur $0,06 \text{ W/m}^2$. Zum Zweiten die Wärme, die Menschen durch Energieerzeugung, Heizung/Kühlung von Gebäuden, und industrielle Prozesse freisetzen: Ihr durchschnittlicher Wert wird mit $0,026 \text{ W/m}^2$ abgeschätzt.¹³

Mit dem Eintrag „Net absorbed 0.9 W/m^2 “ in Abb. 19 deuten die Autoren von [13] an, dass nach ihren Berechnungen die Erde zur Zeit mehr Strahlungsenergie von der Sonne absorbiert als sie selbst in den Weltraum abstrahlt, und deshalb wärmer wird.

2.2 Die Strahlung von Sonne und Erde

Wenn das Spektrum¹⁴ der elektromagnetischen Strahlung, die ein Körper in seine Umgebung emittiert, *ausschließlich* von seiner Temperatur abhängt, und von nichts anderem (also nicht von seinem Material, nicht von seinen chemischen Eigenschaften, nicht von seiner Form, nicht von seiner Größe, ...), dann bezeichnen die Physiker diesen Körper als „Schwarzen Strahler“.

Die Sonne ist in sehr guter Näherung ein Schwarzer Strahler, und die Erde ist es, wenn auch in etwas weniger guter Näherung, ebenfalls. In Abb. 20 werden die Spektren von Schwarzen Strahlern unterschiedlicher Temperatur dargestellt.

Die Oberfläche der Sonne ist ungefähr $5777 \text{ K} = 5504^\circ\text{C}$ heiß. Das Spektrum ihrer Strahlung ist in Abb. 20 als gelbe Linie eingezeichnet.

$300 \text{ K} = 27^\circ\text{C}$; die rote Linie zeigt also das Spektrum der Strahlung, die die Erde an einem schönen Sommertag in Mitteleuropa abstrahlt. Die Sonne strahlt pro m^2 ihrer Oberfläche mehr als eine Million mal so viel Energie ab wie die Erde pro m^2 ihrer Oberfläche (man beachte die logarithmische Skala!).

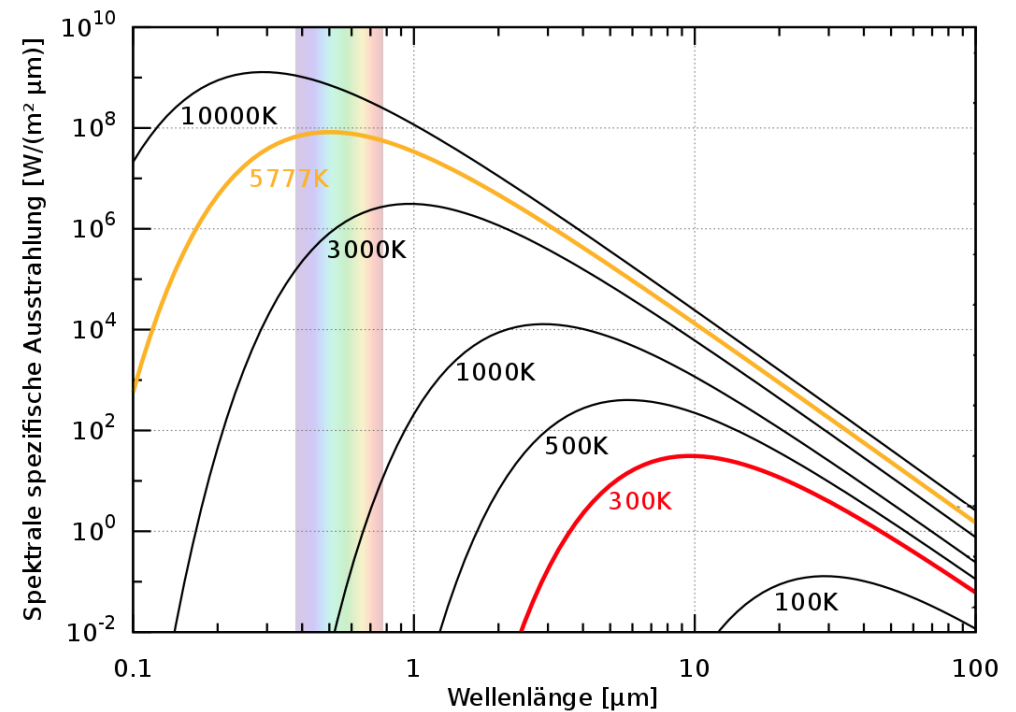


Abb. 20: Die Spektren Schwarzer Strahler. Grafik aus [14].

Mit den Regenbogenfarben ist gekennzeichnet, welche Wellenlängen vom menschlichen Auge in welcher Farbe wahrgenommen werden. Die Strahlung der Erde hat ihr Maximum bei $10 \mu m$. Diese Infrarote Strahlung können Menschen nicht sehen; sie können sie aber mit der Haut spüren. Das Maximum des Sonnenlichts liegt genau in dem Bereich, den das menschliche Auge wahrnimmt. Zufall? Wohl kaum. Vielmehr haben unsere Vorfahren offenbar in den vielen, vielen Millionen Jahren der Evolution gerade solche Augen ausgebildet, die ihnen bei der Suche nach ökologischen Nischen am meisten genützt haben.¹⁵

¹³ Die unmittelbar bei der Verbrennung von Holz, Kohle, Gas, und Erdöl freigesetzte Wärme ist also für die Erwärmung des Weltklimas belanglos, nicht aber die dabei freigesetzten Treibhausgase! Deren Wirkung wird im Folgenden beschrieben. Nebenbei bemerkt: Der gesamte Energieverbrauch der Menschheit beträgt nur $0,026 \text{ W}/161 \text{ W} \approx 0,04\%$ der von der Erde absorbierten Sonnenenergie. Wir können also mit *Leichtigkeit* auf CO_2 -emittierende Energiequellen und Kernenergie verzichten. Wir müssen „nur“ endlich effiziente Methoden zur Zwischenspeicherung von sauberer Energie entwickeln.

¹⁴ Das Spektrum ist die Verteilung der elektromagnetischen Strahlung auf die verschiedenen Wellenlängen.

¹⁵ „Wär’ nicht das Auge sonnenhaft, Wie könnten wir das Licht erblicken?“ Diesen Vers zitiert Goethe in der Einleitung zum Didaktischen Teil seiner Farbenlehre [15]. Hat er damals bereits etwas wichtiges verstanden, ein halbes Jahrhundert vor Darwin? Ich denke, schon.

2.3 Der Treibhauseffekt

Im oberen Teil von Abb. 21 sind nochmal die Strahlungsspektren von Sonne und Erde skizziert, jetzt aber mit einer linearen vertikalen Skala, deswegen sehen sie etwas anders aus als in Abb. 20. Außerdem wird das Spektrum der Strahlung der Erde für $288\text{ K} = +15^\circ\text{C}$ angegeben, die mittlere Temperatur der Erdoberfläche. Und das Sonnenspektrum wurde vertikal so zusammengestaucht, dass es genau so groß erscheint wie das Spektrum der Erde.

Die gelbe und rote Fläche unter den Spektralkurven repräsentiert die Energie, die tatsächlich die Erdoberfläche erreicht, bzw. die tatsächlich von der Erde in den Weltraum abgestrahlt wird. Die Differenz zwischen gelber Kurve und gelber Fläche bzw. roter Kurve und roter Fläche ist der Anteil der Energie, der jeweils von der Atmosphäre absorbiert oder reflektiert wird. Aus dem unteren Teil von Abb. 21 kann man ablesen, welche Bestandteile der Atmosphäre jeweils wirksam sind.

Im harten UV = Ultraviolett mit Wellenlängen kleiner $0,3\text{ }\mu\text{m}$ erreicht praktisch überhaupt keine Sonnenstrahlung den Erdboden. Das liegt zum Einen an der effizienten Absorption durch O_3 = Ozon in diesem Spektralbereich,¹⁶ zum Anderen an der Rayleigh-Streuung,¹⁷ die bei kurzwelliger Strahlung viel wirksamer ist als bei langwelliger Strahlung.¹⁸

Im Infraroten Bereich der Sonnenstrahlung ist die Absorption durch Wasser-Moleküle wirksam.¹⁹ Wolken sind bei der Absorption und Reflexion von Sonnenlicht und von der Strahlung, die die Erde emittiert, noch *viel* wirksamer als die einzelnen Moleküle von Wasserdampf. Jeder weiß dass eine dichte Wolkendecke die nächtliche Abkühlung fast vollständig unterbinden kann, während in sternklaren Nächten die Temperatur *viel* niedriger ist als am Tag. Und eine dichte Bewölkung kann auch leicht mehr als 90 % der einfallenden Sonnenstrahlung reflektieren und absor-

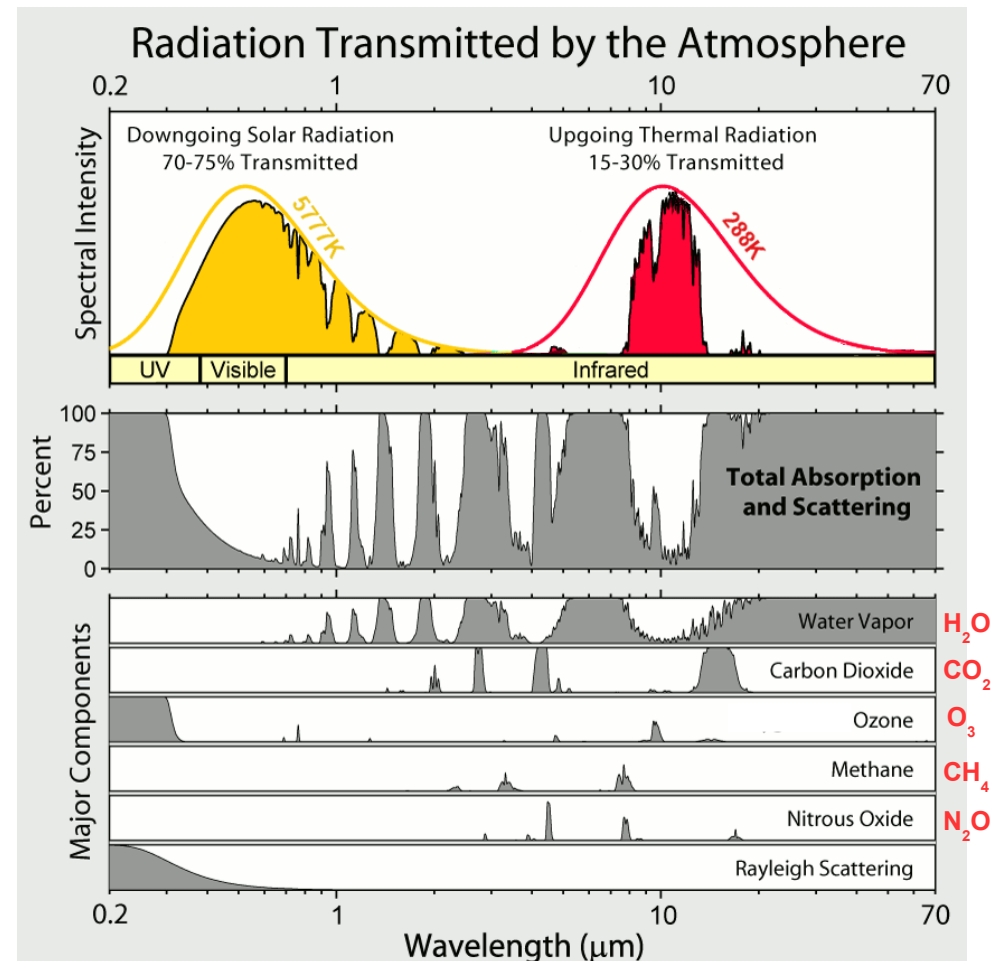


Abb. 21: Die Wirkung der Treibhausgase. Grafik aus [16].

bieren. In Abb. 21 wird stets ein wolkenloser Himmel angenommen. Mit H_2O = Water Vapor sind unsichtbare einzelne Wassermoleküle in der

¹⁶ Als vor einigen Jahren ein großes Ozonloch in der oberen Atmosphäre über der Antarktis entstand, mussten sich die Menschen im Süden von Südamerika (Feuerland) sehr sorgfältig vor Sonnenbrand schützen, selbst wenn sie nur für kurze Zeit ihre Häuser verlassen wollten.

¹⁷ Rayleigh-Streuung heißt ein Vorgang, bei dem Photonen — die Teilchen der elektromagnetischen Strahlung — an den Molekülen der Atmosphäre gestreut (reflektiert) werden wie Billard-Kugeln.

¹⁸ Am frühen Morgen und am Abend erscheint die Sonne rot, weil die Strahlung einen viel weiteren Weg durch die Atmosphäre als am Mittag überwinden muss, bis sie den Erdboden erreicht, und auf dem weiten Weg durch Rayleigh-Streuung viel mehr blaue als rote Strahlung verloren geht.

¹⁹ Für Physiker: Die regelmäßige Abfolge der Absorptionsbanden ist charakteristisch für die Anregung von Vibrationen des Wassermoleküls.

wolkenlosen Luft gemeint.

H₂O beeinflusst nicht nur die einfallende Sonnenstrahlung, sondern auch sehr stark die infrarote Strahlung der Erde. H₂O lässt nur ein schmales „spektrales Fenster“ zwischen etwa 8 und 15 μm offen, durch das infrarote Strahlung von der Erde in den Weltraum entweichen kann. An seiner langwelligen Seite wird dies Fenster aufgrund der Absorption durch CO₂ nochmals enger.

Der Gehalt der Atmosphäre an Wasserdampf ist sehr unterschiedlich. Je kälter die Luft ist, desto schneller kondensiert der Wasserdampf zu Tröpfchen und fällt als Regen zur Erde. Weil die Atmosphäre mit zunehmender Höhe schnell kälter wird, gibt es dort wesentlich weniger Wasserdampf. Der dominierende Einfluss von Wasserdampf, den Abb. 21 suggeriert, beschränkt sich deshalb auf die unteren drei- bis fünftausend Meter. Darüber wird der Einfluss der anderen Treibhausgase CO₂ = Kohlendioxid, CH₄ = Methan, und N₂O = Distickstoffmonoxid (auch Lachgas genannt) viel wichtiger als es in Abb. 21 erscheint.

2.4 Aerosole

Unter dem Namen Aerosole wird eine große Vielfalt von Schwebstoffen in der Luft zusammengefasst. Ihre Größe variiert zwischen wenigen Nanometern und etlichen Mikrometern.²⁰ Es handelt sich unter Anderem um kleine Kristalle von Meersalz, Staub verschiedener Minerale, Sulfate und Asche aus Vulkanausbrüchen, Pollen und Sporen, Ruß und andere Kohlenstoffpartikel, Abrieb von Straßen und Autoreifen, und zahllose weitere Arten von winzigen Partikeln.

Während der Inhalt der Atmosphäre an Treibhausgasen zur Erwärmung der Erde führt, hat ihr Gehalt an Aerosolen im allgemeinen (aber keineswegs immer!) einen kühlenden Effekt: Die Wahrscheinlichkeit dass die Sonnenstrahlung an einem Aerosol-Partikel gestreut wird ist viel größer als die Wahrscheinlichkeit dass die infrarote Strahlung der Erde an dem gleichen Partikel gestreut wird.²¹

In Franken erleben wir beispielsweise hin und wieder bei bestimmten Südwind-Wetterlagen, dass der Himmel durch feinen Sand, der aus der Sahara bis hierher transportiert wurde, gelblich trüb erscheint. Die Sonnenstrahlung ist dann merklich gedämpft (kühlende Wirkung des Aerosols!). Aber der Sand bleibt meist nur wenige Tage in der Luft, dann sinkt er auf den Erdboden, oder wird von Regen ausgewaschen. Wenn der Sand auf einer schneebedeckten Fläche landet (z. B. auf einem Alpenglätscher, oder im Winter auch im Flachland), dann reflektiert der verschmutzte Schnee weniger Sonnenstrahlung als sauberer Schnee. Also absorbiert die Erde jetzt mehr Sonnenenergie als vorher, d. h. auf einmal entfaltet das (ehemalige) Aerosol genau die umgekehrte Wirkung wie in der Atmosphäre! Auch viele andere Aerosole, z. B. Vulkanische Asche, haben in der Atmosphäre einen kühlenden Effekt, aber einen erwärmenden sobald sie auf der Erdoberfläche landen.

Kleine Kohlepartikel (im slang der Klimatologen „black carbon“ genannt) entfalten schon in der Atmosphäre eine erwärmende Wirkung, d. h. sie wirken – anders als die meisten anderen Aerosole – den Treibhausgasen H₂O, CO₂, CH₄, N₂O nicht entgegen, sondern verstärken deren Wirkung.

Weil die Aerosole so verschiedenartig sind, ist ihre richtige quantitative Bewertung eine der größten Schwachstellen der Klimamodelle. Und man darf sie keinesfalls ignorieren, denn ihre Klimawirksamkeit ist kaum geringer als die der Treibhausgase.

²⁰ 1 Mikrometer = 1 μm = 10⁻⁶ m = 0,000 001 m ; 1 Nanometer = 1 nm = 10⁻⁹ m = 0,000 000 001 m

²¹ Das liegt daran dass die meisten Aerosol-Teilchen kleiner sind als die Wellenlänge der infraroten Strahlung, die die Erde emittiert. Das ist wie mit Kieselsteinen auf der Straße: Wenn man mit Rollerskates (kleine Räder) drüber fährt, können sie einen leicht auf die Nase katapultieren. Wenn man mit dem Fahrrad (große Räder) drüber fährt, bemerkt man sie kaum. Genauso wird elektromagnetische Strahlung eher von einem Aerosolpartikel gestreut, wenn ihre Wellenlänge von gleicher Größenordnung oder kleiner ist als das Teilchen, während Strahlung mit wesentlich größerer Wellenlänge das gleiche Teilchen einfach ignoriert. Aus genau dem gleichen Grund ist übrigens kurzwellige Strahlung mehr von Rayleigh-Streuung an Molekülen betroffen als langwellige Strahlung, siehe die unterste Linie in Abb. 21.

2.5 Radiative Forcing

Wenn die Erde mehr Strahlungsenergie von der Sonne absorbiert als sie selbst als infrarote Strahlung in den Weltraum emittiert, dann wird sie wärmer. Umgekehrt kühlt sie sich ab, wenn sie mehr Strahlungsenergie in den Weltraum abstrahlt als sie von der Sonne absorbiert. Wenn die Strahlungsbilanz genau ausgeglichen ist, bleibt die Temperatur der Erde konstant, siehe Abschnitt 2.1.

Was wird geschehen, wenn die N₂O-Konzentration in der Atmosphäre von derzeit 333 ppb (siehe Abb. 13) auf 336 ppb ansteigt? Qualitativ ist die Sache klar: Mehr Treibhausgase in der Atmosphäre behindern die infrarote Strahlung von der Erde in den Weltraum. Also strahlt die Erde jetzt soundsoviel W/m² weniger in den Weltraum ab, als sie von der Sonne absorbiert. Folglich wird sie wärmer, emittiert deshalb mehr infrarote Strahlung (siehe Abb. 20), bis sich schließlich bei einer höheren Erdtemperatur ein neues Strahlungsgleichgewicht eingestellt hat.

Können wir die Frage auch quantitativ beantworten? Um wie viel W/m² genau stört die Erhöhung der N₂O-Konzentration um 3 ppb das Strahlungsgleichgewicht der Erde? Solche Fragen sind extrem schwierig zu beantworten, weil beim Klima alles mit allem zusammenhängt. Wenn ein Parameter sich ändert, dann hat das sofort die Änderung von hunderten anderer Parameter zur Folge. In dieser Situation kann man folgendermaßen weiterkommen: Man nimmt (unrealistischerweise) an, dass es doch möglich wäre an einem einzelnen Parameter zu drehen, ohne dass sich irgend ein anderer Parameter ändert.²²

Dann misst man (in Gedanken) an der Obergrenze der Atmosphäre²³: Was war vor der Änderung des Parameters der Netto-Fluss²⁴ von Strahlungsenergie in Richtung Erde, und was ist der Netto-Fluss dieser Energie nach Änderung des Parameters? Die Änderung dieses Netto-Werts ist dann in unserem Beispiel der Einfluss auf das Strahlungsgleichgewicht (englisch: the *radiative forcing*) von 3 ppb N₂O.

Die Klimatologen halten die folgenden Werte für das Radiative Forcing der Treibhausgase für zumindest näherungsweise korrekt [5, chap. 8, table 8.2]:

	Konzentration		Radiative Forcing
	2011	1750	
CO ₂	391 ppm	278 ppm	1,82 W/m ² pro (391 – 278) ppm = 1,6 · 10⁻⁵ W/m² pro 1 ppb
CH ₄	1803 ppb	722 ppb	0,48 W/m ² pro (1803 – 722) ppb = 4,4 · 10⁻⁴ W/m² pro 1 ppb
N ₂ O	324 ppb	270 ppb	0,17 W/m ² pro (324 – 270) ppb = 3,2 · 10⁻³ W/m² pro 1 ppb
andere	1412 ppb	≈ 0	0,36 W/m ² pro 1412 ppb
Gesamt			2,83 W/m ²

In der Rubrik „andere“ sind ungefähr 2 Dutzend Treibhausgase zusammengefasst, die erst durch die industriellen Aktivitäten der Menschheit in die Welt gekommen sind.

In der Tabelle wurde also das Radiative Forcing für die Änderung der Konzentration des jeweiligen Treibhausgases zwischen 1750 und 2011 abgeschätzt. Man sieht dass CO₂ nur deshalb das (abgesehen von H₂O) wichtigste Treibhausgas ist, weil es in der Atmosphäre so viel davon gibt. Das Radiative Forcing eines einzelnen CH₄ Moleküls ist mehr als 27 mal so groß wie das eines einzelnen CO₂ Moleküls. Und das Radiative Forcing eines einzelnen N₂O Moleküls ist sogar 200 mal so groß wie das eines einzelnen CO₂ Moleküls.

Man muss die genauen Zahlenwerte, die für das Radiative Forcing einzelner Gase angegeben werden, mit Vorsicht betrachten; denn die Annahme dass man beim Klima irgend einen Parameter verstellen könnte ohne dabei auch zahllose andere Änderungen zu bewirken, ist wirklich sehr realitätsfern. Trotzdem ist das „Radiative Forcing“-Konzept nützlich, weil es für einfache Abschätzungen durchaus brauchbare Werte liefert.²⁵

²² In Varianten des Konzepts nimmt man an, dass sich aufgrund der Änderung dieses einen Parameters doch eine kleine Anzahl bestimmter anderer Parameter ändert, alle restlichen Parameter jedoch unverändert bleiben, siehe [5, chap. 8, sec. 8.1.1].

²³ Dies ist eine Vereinfachung, für die genaue Definition siehe [5, chap. 8, sec. 8.1.1].

²⁴ also die Differenz zwischen der Strahlungsenergie die die Erde von der Sonne absorbiert, und der Strahlungsenergie die die Erde in den Weltraum emittiert

²⁵ Z. B. für die Frage nach der Wirkung von zusätzlich 3 ppb N₂O in der Atmosphäre. Aus der Tabelle folgt: Die Erde wird aufgrund dieser Änderung ungefähr 9 · 10⁻³ W/m² weniger Strahlung in den Weltraum emittieren als zuvor.

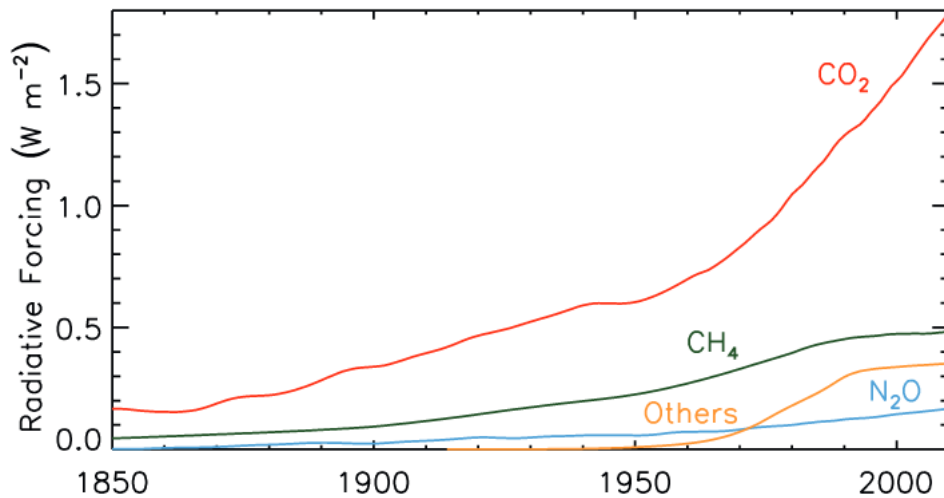


Abb. 22: Radiative Forcing der Treibhausgase. Grafik aus [5, chap. 8].

Die weiterhin steigende Bedeutung von CO_2 wird in Abb. 22 erkennbar. Das Radiative Forcing der Treibhausgase wird von Jahr zu Jahr mehr von CO_2 dominiert.

Das Radiative Forcing Konzept wird auch auf die Aerosole angewendet, siehe Abb. 23. Die senkrechten Linien rechts geben die Unsicherheit der jeweiligen Werte von 2011 an. Die Unsicherheiten sind teilweise so riesig, dass diese Linien nicht auf die Grafik passen; die Zahlenwerte an den Pfeilen bezeichnen die Enden dieser Linien außerhalb des gezeichneten Bereichs. Die Aerosole sind deshalb so schwierig in Zahlen zu fassen, weil sie zeitlich und räumlich sehr unregelmäßig auftreten, in sich sehr verschiedenartig sind (Nitrat und Nitrat ist nicht das gleiche), und weil sie sehr kompliziert mit Wolken wechselwirken: Einerseits können sie Kondensationskeime für Wolken sein, dann wird das negative Radiative Forcing verstärkt, weil Wolken sehr effizient Sonnenstrahlung reflektieren. Andererseits können sie bewirken, dass ohnehin vorhandene Wolken früher abregnen; dadurch ergibt sich auf einmal ein positives Radiative Forcing.

Das Radiative Forcing von BC = black carbon = Ruß ist positiv, wirkt also erwärmend. Für BioBurn, das sind insbesondere großflächige Brandrodungen wie sie in Indonesien und Brasilien üblich sind, wird das Radia-

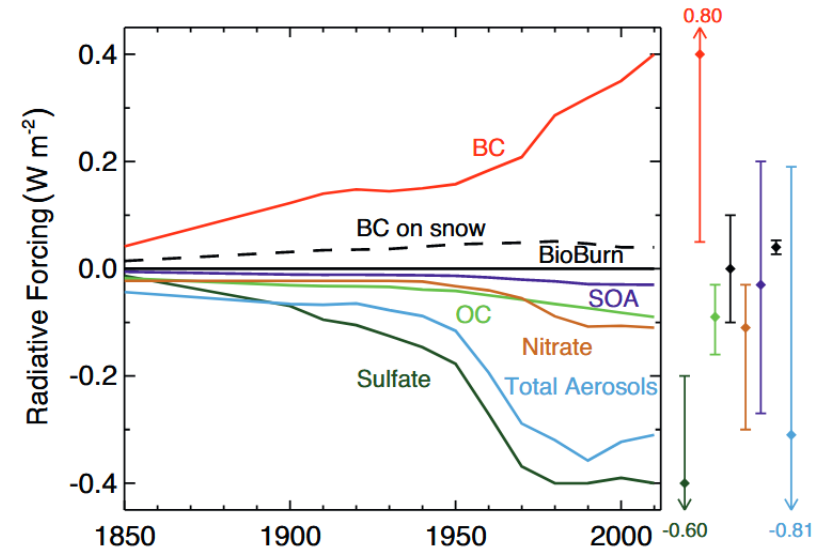


Abb. 23: Radiative Forcing der Aerosole. Grafik aus [5, chap. 8].

tive Forcing mit Null angesetzt, weil erwärmende und kühlende Wirkungen in etwa gleich groß sind. SOA = Secondary Organic Aerosols sind Stoffe, die erst in der Atmosphäre durch chemische Reaktionen anderer Gase entstehen. OC = Organic Carbon; das sind Aerosole, die nicht (wie Black Carbon) aus reinem Kohlenstoff bestehen, sondern in denen Kohlenstoff in organischen Verbindungen vorliegt. Sulfate stammen größtenteils aus Vulkanausbrüchen.

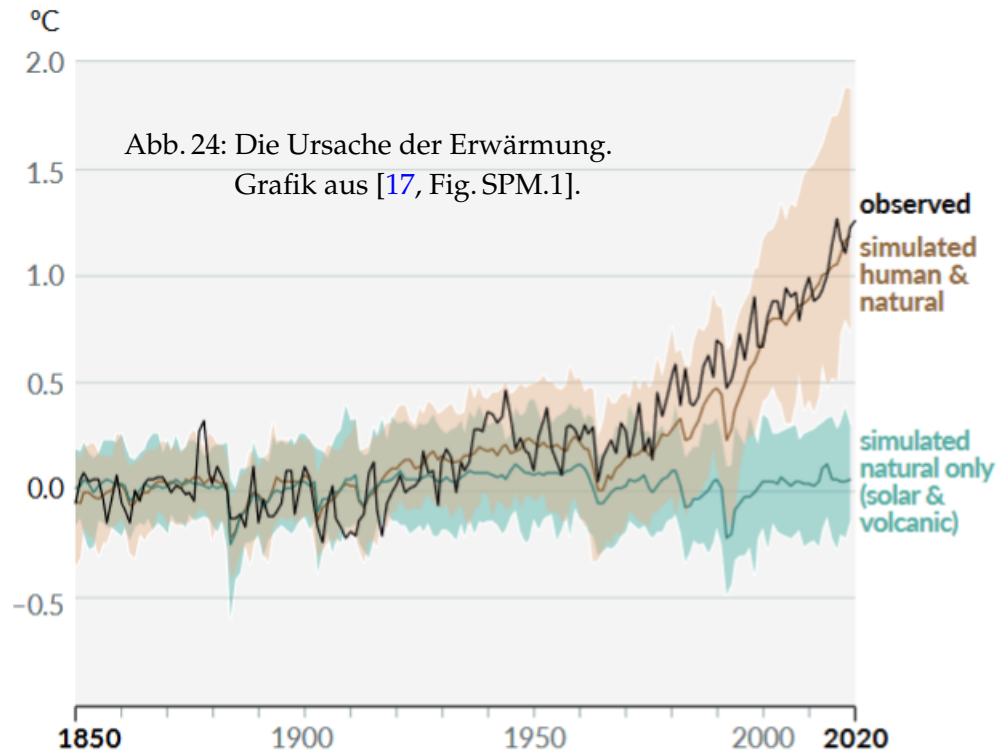
Die vertikale Achse von Abb. 23 ist ungefähr doppelt so weit aufgespreizt wie in Abb. 22. Der Einfluss der Aerosole auf die Strahlungsbilanz ist also kleiner als der Einfluss der Treibhausgase, aber nicht viel kleiner. Die Autoren von [5, chapter 8] schätzen, dass in 2011 etwa ein Drittel des positiven Radiative Forcings der Treibhausgase durch das negative Radiative Forcing der Aerosole kompensiert wurde, betonen aber auch die große Unsicherheit in der Wissenschaft hinsichtlich der richtigen Bewertung der Aerosole.

Die Rodung von Wald zur landwirtschaftlichen (oder sonstigen) Nutzung bewirkt, dass mehr einfallende Sonnenstrahlung reflektiert wird. Das Radiative Forcing von Landnutzung wird mit $-0,15 \pm 0,10 \text{ W/m}^2$ abgeschätzt [5, chap. 8].

3. Ursache(n) der Globalen Erwärmung

In Abschnitt 1 wurden Messergebnisse, insbesondere der allgemeine Anstieg der Temperatur, und der Anstieg der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, kommentarlos nebeneinander gestellt. In diesem Abschnitt geht es um den Nachweis, dass erstens der Temperaturanstieg von der zunehmenden Konzentration von Treibhausgasen bewirkt wird, und dass zweitens die zunehmende Konzentration von Treibhausgasen durch die industriellen und landwirtschaftlichen Aktivitäten von Menschen bewirkt wird.

Klimaänderungen hat es bekanntlich auf der Erde in der Vergangenheit immer wieder gegeben. Auf Eiszeiten folgten Warmzeiten, und darauf



wieder Eiszeiten... Derartige natürliche Klimaänderungen werden im Slang der Wissenschaftler „internal variability“ genannt.

Könnte es sich möglicherweise bei der gegenwärtigen Erwärmung um nichts anderes als einen Fall von „internal variability“ handeln? Um diese Frage zu klären haben die Klimatologen Computermodelle entwickelt, die im Lauf der Jahre immer detaillierter und zuverlässiger geworden sind. Mit diesen Modellen lässt sich Wirkung und Bedeutung der verschiedenen möglichen Einflussfaktoren auf die Klimaentwicklung berechnen.

Abb. 24 zeigt ein Beispiel, in dem das Ergebnis mehrerer kombinierter Modellrechnungen vorgestellt wird. Man sieht, dass die Modelle (braune Linie) die beobachtete Temperaturentwicklung (schwarze Linie) ganz gut nachbilden. Aber nur dann, wenn man sämtliche Einflussfaktoren, einschließlich der menschengemachten, berücksichtigt. Wenn man die Rechnungen ohne die von Menschen emittierten Treibhausgase und Aerosole durchführt, erhält man die grüne Linie, bei der es überhaupt keinen langfristigen Temperaturanstieg gibt. Daraus ziehen die Wissenschaftler des IPCC die Schlussfolgerung [18, A.1.2, A.1.3]:

- * The *likely*¹¹ range of total human-caused global surface temperature increase from 1850 – 1900 to 2010 – 2019 is 0.8°C to 1.3°C, with a best estimate of 1.07°C. Over this period, it is *likely*¹¹ that well-mixed greenhouse gases (GHGs) contributed a warming of 1.0°C to 2.0°C²⁶ and other human drivers (principally aerosols) contributed a cooling of 0.0°C to 0.8°C, natural (solar and volcanic) drivers changed global surface temperature by –0.1°C to +0.1°C, and internal variability changed it by –0.2°C to +0.2°C.
- * Observed increases in well-mixed GHG concentrations since around 1750 are unequivocally caused by GHG emissions from human activities over this period.

In Abb. 25 auf der nächsten Seite werden die Ergebnisse weiterer Klimamodelle detaillierter gezeigt:

²⁶ Contributions from emissions to the 2010 – 2019 warming relative to 1850 – 1900 assessed from radiative forcing studies are: CO₂ 0.8 [0.5 to 1.2]°C; methane 0.5 [0.3 to 0.8]°C; nitrous oxide 0.1 [0.0 to 0.2]°C and fluorinated gases 0.1 [0.0 to 0.2]°C.

In der oberen Grafik schwarz eingetragen ist die gemessene mittlere Temperatur der Erdoberfläche. Die Temperatur ist in wesentlich feineren Zeitschritten dargestellt als in Abb. 1, weil die Klimasimulationen natürlich nicht mit Jahresmittelwerten durchgeführt werden können.

In den unteren fünf Grafiken sieht man die Temperaturänderungen, die sich in vier verschiedenen Simulationen durch die einzelnen Einflussfaktoren ergeben haben.

El Niño ist die bekannte wechselnde Meeresströmung im äquatorialen Pazifik, die für das amerikanische Klima ähnlich wichtig ist wie der Golfstrom für das europäische. Mit Southern Oscillation ist die großräumige Zirkulation in der Atmosphäre gemeint, die mit El Niño eng zusammenhängt.

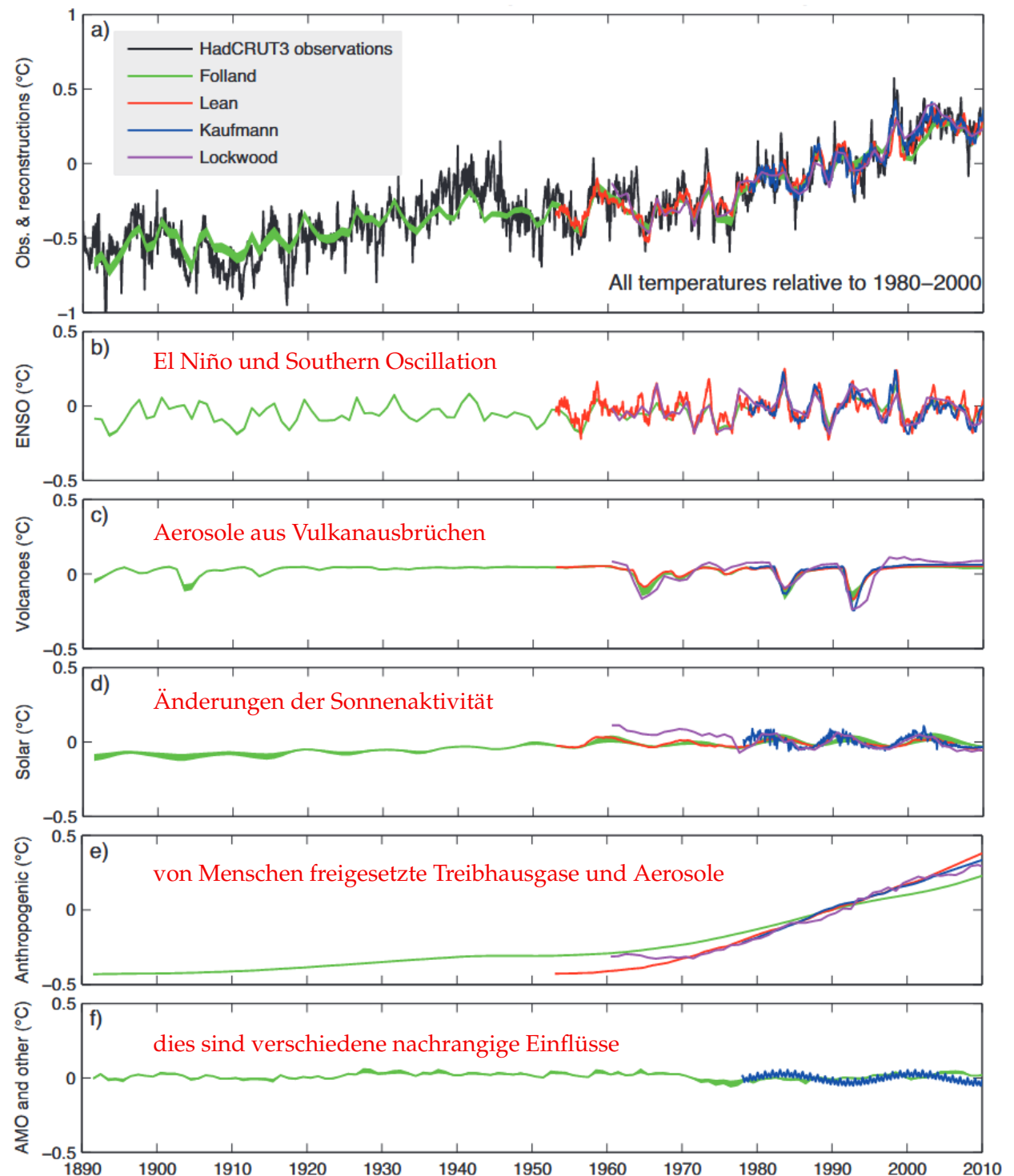
Grafik c) enthält die Simulation mehrerer Vulkanausbrüche. Der letzte und stärkste Peak wurde durch den Ausbruch des Pinatubo in 1991 erzeugt. Wenn man genau hinschaut sieht man, dass der Temperaturbeitrag einige Jahre nach den Ausbrüchen über Null liegt, weil dann die Asche zum Boden gesunken ist und die verschmutzten Böden (besonders verschmutzte Oberflächen von Schnee und Eis) mehr Sonnenstrahlung absorbieren als saubere Böden.

In Graphik d) erkennt man den Einfluss des etwa 11-jährlichen Sonnenzyklus.

Die in Graphik e) gezeigte Erwärmung ist die einzige, auf die Menschen Einfluss nehmen können.

Die Summe der in b) bis f) gezeigten Temperaturbeiträge wurde in a) über die schwarze Temperaturkurve gemalt. Es gibt Unstimmigkeiten zwischen Messung und Simulation um die Jahre 1909 und 1944 herum; insgesamt geben die simulierten Kurven aber die gemessene recht gut wieder.

Abb. 25: Einfluss verschiedener Faktoren auf die Temperatur, berechnet mit vier verschiedenen Klimamodellen. Grafik aus [5, chap. 10].



Der entscheidende Punkt ist, dass in diesen Simulationen *ausschließlich* der von Menschen verursachte Anstieg von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre die langfristige Erwärmung der Erde bewirkt. Die Beiträge aller anderen Faktoren zappeln nur um den Nullpunkt herum.

In Abb. 26 werden diese Ergebnisse zusammengefasst: Die Temperatur der Erdoberfläche ist bis 2020 gegenüber der Temperatur im Zeitraum 1850–1900 um $1,07^\circ\text{C}$ angestiegen (grauer Balken). Das entspricht genau der Summe von menschengemachter Erwärmung durch Treibhausgase ($+1,5^\circ\text{C}$, roter Balken) und menschengemachter Kühlung durch Aerosole ($-0,4^\circ\text{C}$, blauer Balken). Die Beiträge von Sonnenaktivität, Vulkanausbrüchen, und Internal Variability (= natürlichen Klimaschwankungen) liegen bei Null.

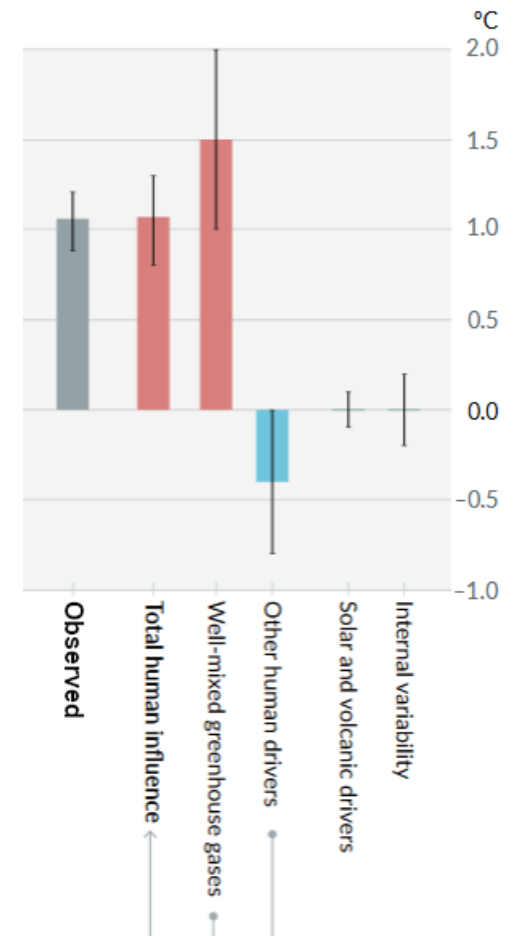
Daraus ergibt sich die eindeutige Schlussfolgerung:

Die steigende Konzentration von menschengemachten Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre erklärt *qualitativ und quantitativ* den globalen Anstieg der Temperatur, den wir seit einigen Jahrzehnten erleben. Die Wissenschaft kennt keine anderen Einflussfaktoren, die – allein oder in Kombination – diesen Temperaturanstieg erklären könnten.

Übrigens: Die Einsicht, dass Änderungen der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre enorme Auswirkungen auf die Temperatur der Erdoberfläche haben, ist keineswegs neu. Schon 1896 veröffentlichte der bekannte Chemiker Svante Arrhenius einen Artikel [19], in dem er ziemlich detailliert beschrieb wie sich eine Zunahme der CO_2 -Konzentration²⁷ in der Luft auf die Erwärmung der Erdoberfläche auswirken würde.

²⁷ Arrhenius benutzte für Kohlendioxid den damals üblichen Namen „carbonic acid“.

Abb. 26: Die Ursache der Erwärmung.
Grafik aus [17, Fig. SPM.2].

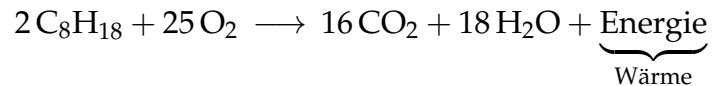


4. Emission und Absorption von Treibhausgasen

Treibhausgase in der Atmosphäre sind lebensnotwendig — das gilt wortwörtlich, ohne Treibhausgase wäre es auf der Erde zu kalt für jegliches Leben. Andererseits darf es aber nicht zu viel davon geben, sonst steigt die Temperatur auf der Erde in bedrohlicher Weise an, so wie wir das derzeit erleben. Wenn man verstehen will warum das natürliche Gleichgewicht, das im Haushalt der Treibhausgase seit hunderttausenden Jahren geherrscht hat, nun auf einmal aus dem Ruder läuft, dann muss man also sehr genau hinschauen, und die relevanten Prozesse im Detail analysieren.

4.1 Der Kohlenstoff-Kreislauf

Die Verbrennung von beispielsweise Oktan (C_8H_{18}) zu Kohlendioxid und Wasser wird durch die chemische Gleichung



beschrieben. Bei derartigen Verbrennungsprozessen wird Energie in Form von Wärme frei.

Umgekehrt muss man zusätzliche Energie in die chemische Reaktion hineinstecken, wenn man CO_2 reduzieren möchte. Genau das machen die grünen Pflanzen bei der Photosynthese:²⁸



Kohlendioxid und Wasser sind für Pflanzen genauso unverzichtbare Nahrungsmittel wie Sauerstoff und die von Pflanzen synthetisierten Kohlenstoff-Verbindungen für Menschen und Tiere. Weil die Pflanzen

während ihrer Wachstumsphase im Sommer viel mehr Photosynthese betreiben als im Winter, während Emission von CO_2 durch den Stoffwechsel von Menschen, Tieren und Mikroorganismen, und durch die industriellen Aktivitäten der Menschen das ganze Jahr hindurch gleichmäßig geschieht, gibt es die charakteristischen Sommer/Winter Zyklen der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre, die man in Abb. 10 und 14 sieht.

In Abb. 27 auf der nächsten Seite werden die hauptsächlichen CO_2 -Ströme skizziert. Die verwendete Einheit ist

$$\begin{aligned} Pg &= \text{Peta-Gramm} = 10^{15} \text{ Gramm} = 10^9 \text{ Tonnen} = \\ &= \text{Milliarden Tonnen} = \text{Gigatonnen} = \text{Gt} . \end{aligned}$$

Es ist bei der Beschreibung solcher Kreislaufprozesse üblich nicht das Gewicht von CO_2 = Kohlendioxid anzugeben, sondern das Gewicht des darin enthaltenen C = Kohlenstoffs, also nur $12/(12 + 16 + 16)$ des Gewichts von CO_2 , und dies durch den Buchstaben C an Pg bzw. Gt zu kennzeichnen:

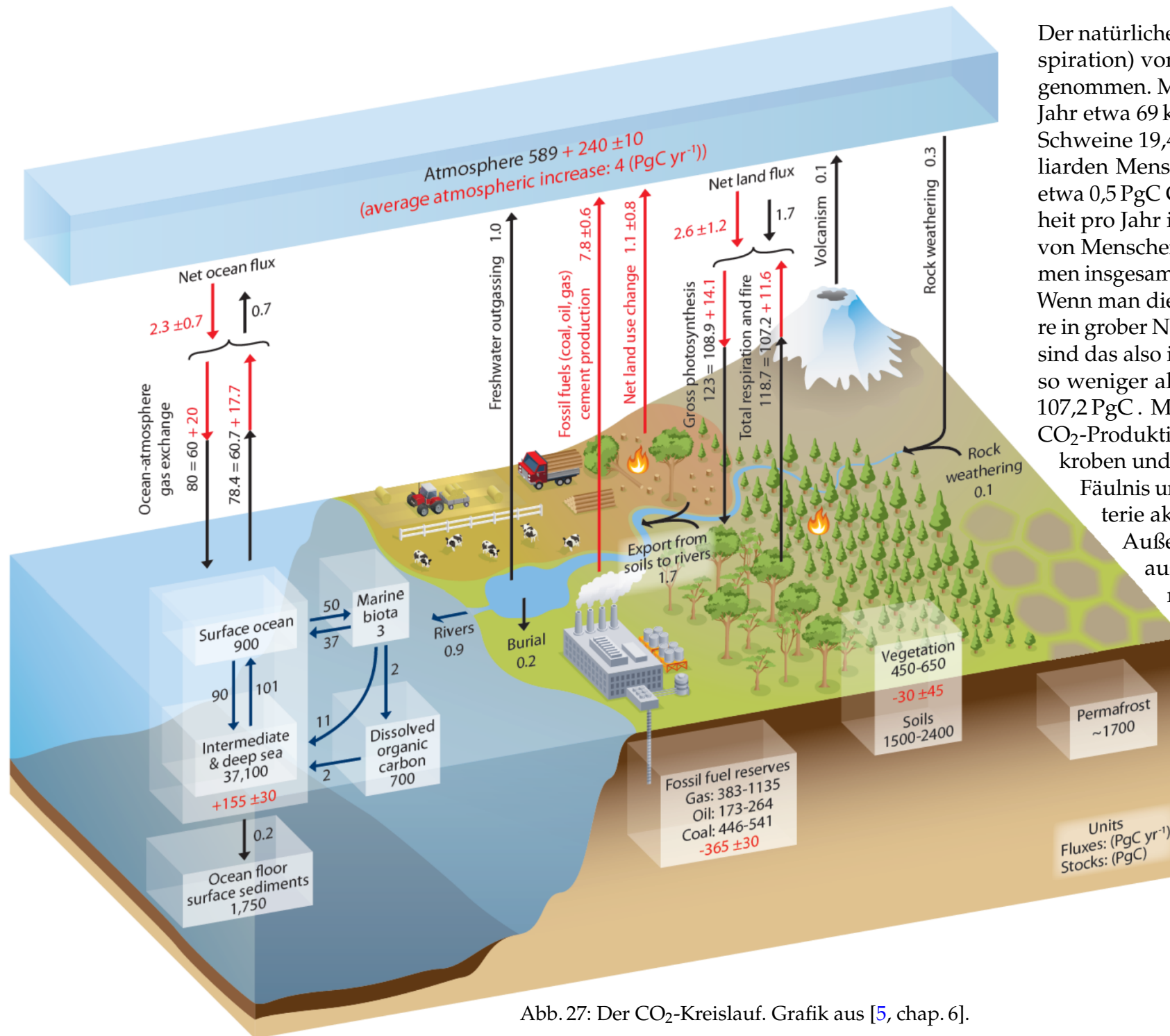
$$\begin{aligned} 1 \text{ PgC } CO_2 &= 1 \text{ GtC } CO_2 = (12 + 16 + 16)/12 \text{ Pg } CO_2 \approx \\ &\approx 3,67 \text{ Pg } CO_2 = 3,67 \text{ Gt } CO_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pg } CO_2 &= 1 \text{ Gt } CO_2 = 12/(12 + 16 + 16) \text{ PgC } CO_2 \approx \\ &\approx 0,27 \text{ PgC } CO_2 = 0,27 \text{ GtC } CO_2 \end{aligned}$$

Übrigens: 1 ppm CO_2 in der Atmosphäre wiegt 2,1 PgC .

Die „natürlichen“ Beiträge sind in Abb. 27 schwarz geschrieben, die durch industrielle und landwirtschaftliche Aktivitäten von Menschen hinzukommenden rot. Alle Zahlenwerte sind mittlere Werte pro Jahr in der Periode 2000 – 2009 .

²⁸ Diese Darstellung ist stark vereinfacht. Die Photosynthese läuft über mehrere Zwischenschritte, und es werden außer Zucker auch zahlreiche andere Kohlenstoff-Verbindungen gebildet.



Der natürliche Anteil an der Ausatmung (respiration) von CO₂ wird mit 107,2 PgC angenommen. Menschen atmen pro Kopf und Jahr etwa 69 kgC CO₂ aus, Rinder 217 kgC, Schweine 19,4 kgC [20]. Bei derzeit 7,7 Milliarden Menschen auf der Erde ergibt das etwa 0,5 PgC CO₂, das die gesamte Menschheit pro Jahr in die Atmosphäre atmet. Die von Menschen gehaltenen Tierbestände atmen insgesamt 3–4 mal so viel CO₂ aus [21]. Wenn man die CO₂-Produktion der Wildtiere in grober Näherung gleich groß abschätzt, sind das also insgesamt etwa 3 PgC CO₂, also weniger als 3 % der Gesamtmenge von 107,2 PgC. Mehr als 97 % der natürlichen CO₂-Produktion geht auf das Konto von Mikroben und Kleinstlebewesen, die bei der Fäulnis und Verrottung organischer Materie aktiv sind.

Außerdem tragen der nicht genau ausbalancierte CO₂-Austausch mit den Meeren sowie kleine CO₂-Mengen aus dem Süßwasser und aus Vulkanen zur Anreicherung der Atmosphäre mit CO₂ bei.

Die mit Abstand wichtigste natürliche CO₂-Senke ist die Photosynthese, die pro Jahr 108,9 PgC CO₂ aus der Luft filtert. Dazu wird noch etwas CO₂ bei der Verwitterung von Gestein gebunden.

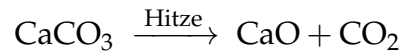
In Summe nimmt nach dieser Abschätzung auf-

Abb. 27: Der CO₂-Kreislauf. Grafik aus [5, chap. 6].

grund der natürlichen Prozesse die CO₂-Menge in der Atmosphäre pro Jahr um 0,2 PgC ab.

Bei den menschengemachten Beiträgen zur CO₂-Bilanz der Atmosphäre, die in Abb. 27 in rot eingezeichnet sind, tragen die Verbrennung fossiler Energieträger und die Zementproduktion am meisten bei. In Abb. 28 ist der Anstieg dieser Beiträge von 1750 bis 2014 dargestellt. Erst seit Mitte des 19. Jahrhunderts gibt es einen nennenswerten Kohleverbrauch, der seit Beginn des 21. Jahrhunderts so rasant ansteigt wie niemals zuvor, und nach vierzig Jahren den Beitrag von Erdöl wieder überholt hat. Mit „flaring“ ist das Abfackeln von Erdgas gemeint, das bei vielen Ölquellen als unerwünschtes Nebenprodukt auftritt. Das allgemein übliche Flaring sorgt dafür, dass die Erzeugerländer von Erdöl in den Statistiken der pro Kopf Emission von CO₂ regelmäßig an der Spitze liegen.

Bei der Zementproduktion wird CO₂ emittiert, weil gebrannter Kalk = Kalziumoxid = CaO, der gemäß



aus Kalk = Kalziumkarbonat = CaCO₃ gewonnen wird, ein zentraler Bestandteil von Zementpulver ist.

2014 wurden laut Abb. 28 insgesamt etwa 9,5 PgC Kohlendioxid bei der Nutzung fossiler Brennstoffe und der Produktion von Zement emittiert. Die Grafik ist mit Abb. 27 konsistent, in der der Mittelwert der Jahre 2000 – 2009 mit 7,8 PgC eingetragen ist.

Ein weiterer menschengemachter Beitrag zur Anreicherung der Atmosphäre mit CO₂ wird in Abb. 27 „net land use change“ genannt. Hier muss man das Wort net = Netto ernst nehmen. Wenn ein Urwald gerodet und zur Sojapflantage umgewidmet wird, dann findet auf dieser Fläche weitaus weniger Photosynthese statt als zuvor. Andererseits entsteht später aus den Sojapflanzen auch weniger CO₂ als durch Fäulnisprozesse aus den Bäumen des Urwalds. Insgesamt überwiegt aber der positive Effekt von Wald auf die CO₂-Bilanz der Erde bei weitem. Aufforstung ist – nach der Vermeidung von CO₂-Produktion – die wirksamste Maßnahme zur Begrenzung des Anstiegs der Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre. Umgekehrt tragen die großflächigen Brandrodungen im

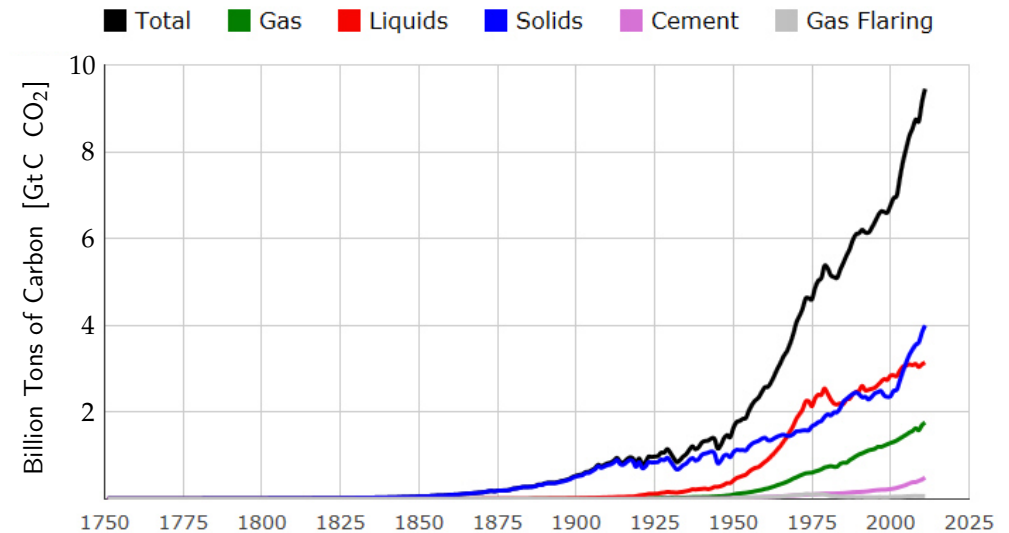


Abb. 28: Globale jährliche Emission von CO₂ aus Verbrennung fossiler Energieträger und Zementproduktion. Grafik aus [22].

Urwald des Amazonasgebiets, die derzeit (2019 – 2021) in Brasilien stattfinden, zur Verschärfung der Situation bei.

Die erhöhte CO₂-Konzentration in der Luft wirkt auf die grünen Pflanzen wie Dünger. Sie vergrößern ihre Photosynthese-Leistung, und wachsen schneller. Dieser Effekt wird in Abb. 27 mit 2,6 PgC CO₂ pro Jahr angegeben.²⁹

Unterm Strich wurde die Atmosphäre in den Jahren 2000 – 2009 pro Jahr mit zusätzlich 6,3 PgC CO₂ angereichert. 2,3 PgC davon gab die Atmosphäre an die Meere weiter, was zur Versauerung der Meere führte, siehe Abschnitt 1.6. Der Rest, also 4 PgC CO₂ pro Jahr, blieb in der Luft und verstärkte den Treibhauseffekt. Diese 4 PgC CO₂ pro Jahr vergrößerten die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre in der Periode 2000 – 2009 um 4 ppm / 2,1 = 1,9 ppm pro Jahr. Das stimmt mit den Messergebnissen von Abb. 10 überein.

²⁹ Warum dieser Effekt als 14,1 – 11,6 angegeben wird habe ich nicht verstanden.

	Ungefähre CO ₂ -Produktion pro Jahr im Zeitraum 2000 – 2009
Ausatmung Menschen	0,5 GtC CO ₂
Ausatmung Wildtiere und Mikroben	104,9 GtC CO ₂
Ausgasung Gewässer	1,7 GtC CO ₂
Ausgasung Vulkane	0,1 GtC CO ₂
Ausatmung Viehherden	1,8 GtC CO ₂
Fossile Brennstoffe	7,5 GtC CO ₂
Zementherstellung	0,3 GtC CO ₂
net land use change	1,1 GtC CO ₂
Summe	117,9 GtC CO ₂

Die Quellen, die die Atmosphäre mit CO₂ anreichern, sind in der Tabelle zusammengestellt. Insgesamt wurden in den Jahren 2000 – 2009 pro Jahr durchschnittlich 117,9 GtC CO₂ produziert, aber „nur“ 6,3 GtC CO₂ landeten dauerhaft in der Luft oder den Ozeanen. $(117,9 - 6,3) \text{ GtC} = 111,6 \text{ GtC CO}_2$ konnten auf natürliche Weise abgebaut werden. Umgekehrt formuliert: Es wurden pro Jahr 6,3 GtC CO₂ mehr produziert als klimaverträglich gewesen wäre.³⁰

Um den Temperaturanstieg auf der Erde zu stoppen, müssen wir die jährliche globale CO₂-Produktion um etwa
 $6,3 \text{ GtC} = 23,1 \text{ Gt CO}_2$
im Vergleich zum Durchschnittswert der Jahre 2000 – 2009 vermindern.³⁰

Die Beiträge zur CO₂-Bilanz, auf die wir Zugriff haben, sind in der Tabelle rot markiert. Überlegen wir zunächst den Punkt „net land use change“. Statt Wälder zu roden könnten wir doch die Erde aufforsten, und damit das für industrielle Aktivitäten zulässige CO₂-Budget vergrößern. Wenn wir unverändert alljährlich genau so viel CO₂ in die Luft blasen wollen wie im Durchschnitt der Jahre 2000 – 2009, wieviel Aufforstung ist dann weltweit erforderlich, damit die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre trotzdem nicht ansteigt?

Man kann grob abschätzen, dass 80 Millionen Hektar = 800 000 km² Wald pro Jahr durch Photosynthese etwa $1 \text{ Gt CO}_2 = 1 \text{ GtC} \cdot 12 / (12 + 2 \cdot 16) \text{ CO}_2 = 0,27 \text{ GtC CO}_2$ aus der Luft filtern [12, sec. 3.6 box 7]. Wir können also das zulässige CO₂-Jahresbudget um 6,3 GtC CO₂ erhöhen, indem wir $6,3 \cdot 800\,000 \text{ km}^2 / 0,27 \approx 19 \text{ Millionen km}^2$ Erdoberfläche aufforsten. 19 Millionen km², das ist etwas mehr als die Fläche von Südamerika (18 Millionen km²) oder knapp doppelt so viel wie die Fläche von Europa (10 Millionen km²).

Das sind vollkommen unrealistische Größenordnungen. Ein realistischeres Ziel wäre es, wenigstens die an manchen Stellen vielleicht unvermeidlichen Rodungen durch Aufforstungen an anderen Stellen zu kompensieren. Wenn das gelingt, dann müssen bei den drei anderen rot gefärbten Posten in der Tabelle „nur“ $(6,3 - 1,1) \text{ GtC} = 5,2 \text{ GtC} = 19,1 \text{ Gt CO}_2$ eingespart werden.³⁰

Eine differenzierte Diskussion möglicher Szenarien, mit denen die erforderliche CO₂-Reduktion erreichbar ist, findet man im Report SR15 [12, chap. 2] des IPCC.

Tatsächlich ist die Welt von der erforderlichen Reduktion der CO₂-Emissionen aber leider noch *sehr* weit entfernt. Im Frühjahr 2025 veröffentlichte die [Internationale-Energie-Agentur](#) einen Report [23], aus dem die Grafiken auf der folgenden Seite stammen:

³⁰ Man darf den Zahlenwert $6,3 \text{ GtC} = 23,1 \text{ Gt CO}_2$ nicht auf die Goldwaage legen; zum einen steckt darin ja die erhöhte Photosyntheseleistung der Pflanzen aufgrund der überhöhten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, d. h. es gibt hier einen komplizierten nicht-linearen Zusammenhang. Und zum zweiten ist es eine grobe Vereinfachung nur auf das CO₂ zu schauen ohne daran zu denken wie sich gleichzeitig andere Parameter ändern, die ebenfalls das Klima beeinflussen. Ich halte es aber für sinnvoll einen Zahlenwert zu nennen, der zumindest größenordnungsmäßig nicht ganz falsch ist, damit wir wissen wohin wir kommen müssen.

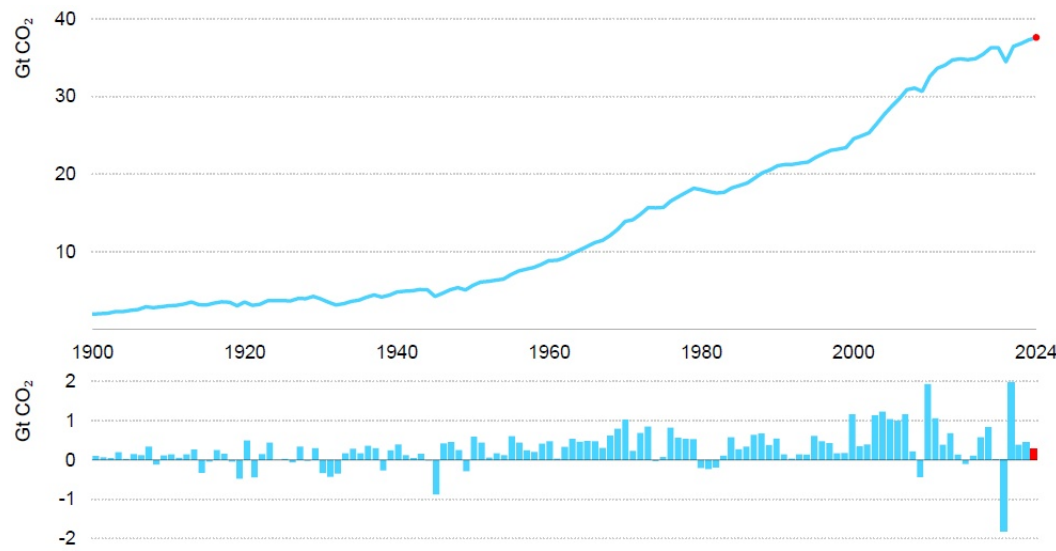


Abb. 29: Globale jährliche Emission von CO₂ aus Verbrennung fossiler Energieträger. Grafik aus [23].

In der oberen Grafik von Abb. 29 ist das Gewicht des jährlich bei der Energieerzeugung emittierten CO₂ (nicht nur des darin enthaltenen C!) bis zum Jahr 2024 einschließlich aufgetragen, in der unteren Grafik die Änderung gegenüber dem Vorjahr. Nur 2020 gab es aufgrund der Corona-Epidemie einen deutlichen Rückgang der Emissionen, und 2009 einen kleineren Rückgang aufgrund der Welt-Finanzkrise. Davon abgesehen steigen die Emissionen nach wie vor jedes Jahr weiter an.

Aus Abb. 30 kann man die CO₂-Emissionen pro Land und pro Kopf ablesen. Bei der Pro-Kopf-Emission hat China inzwischen Platz 2 hinter den USA erreicht.

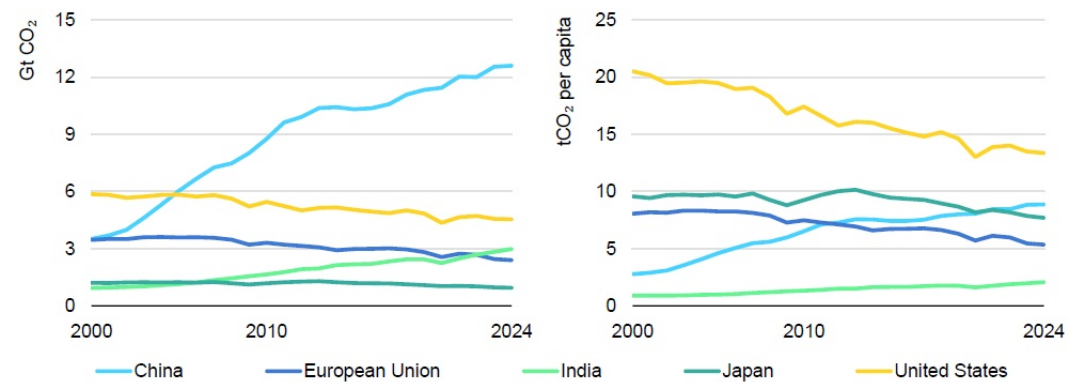


Abb. 30: Globale jährliche Emission von CO₂ pro Land (links) und pro Kopf (rechts) aus Verbrennung fossiler Energieträger. Grafik aus [23].

Könnte man nicht, statt auf die Verbrennung fossiler Energieträger zu verzichten, das erzeugte CO₂ einfangen und irgendwie unschädlich einlagern, statt es einfach in die Luft zu blasen? Wenn man Biomasse verbrennen und das erzeugte CO₂ einfangen und einlagern würde, dann wäre die CO₂-Bilanz sogar negativ, weil die Biomasse zuvor der Atmosphäre CO₂ durch Photosynthese entzogen hat. Diese Idee läuft unter dem Namen CCS = Carbon Capture and Storage. Eine gute Einführung in dies Thema findet man in Wikipedia [24]. Nach meinem laienhaften Eindruck (*confidence level: more likely than not*¹¹) gibt es bei CCS noch viel mehr Probleme als beim Umstieg auf klimaneutrale Energiequellen, sodass CCS nicht die Lösung des CO₂-Problems sein wird, und wahrscheinlich noch nicht einmal einen nennenswerten Beitrag zur Lösung des Problems liefern wird.

4.2 Die CH₄-Bilanz

Methan (CH₄) gelangt auf vielen verschiedenen Wegen, die in Abb. 31 schematisch skizziert sind, in die Atmosphäre. Die Werte sind in diesem Fall mit

Tg = Tera-Gramm = 10^{12} Gramm =
 = 10^6 Tonnen = Millionen Tonnen =
 = Mega-Tonnen = Mt

angegeben und beziehen sich auf das Gewicht des kompletten CH₄-Moleküls, nicht nur auf den darin enthaltenen Kohlenstoff. 1 ppb CH₄ in der Atmosphäre wiegt 2,75 Tg. Auffällig ist die große Unsicherheit bei den Zahlenangaben in Abb. 31.

187 bis 366 Tg CH₄ werden bei Fäulnis- und Gärungsprozessen in Sümpfen und im Uferschlick von Gewässern erzeugt; 9 bis 47 Tg werden nach einiger Zeit wieder vom Boden absorbiert. Termiten erzeugen 2 bis 22 Tg CH₄, weitere 33 bis 75 Tg entstehen bei geologischen Prozessen. Macht insgesamt 175 bis 454 Tg CH₄, die durch natürliche Prozesse in die Atmosphäre emittiert werden.

32 bis 39 Tg CH₄ aus der Verbrennung von Biomasse sind gelb skizziert, weil die Klimatologen sich nicht entscheiden wollten ob das ein natürlicher oder ein von Menschen veranstalteter Prozess ist.

Eindeutig menschengemacht sind 152 bis 195 Tg CH₄ aus der Verrottung in Müllkippen, 87 bis 94 Tg CH₄ die von wiederkäuenden Vieherden (Rinder, Schafe) ausgerülpst werden,

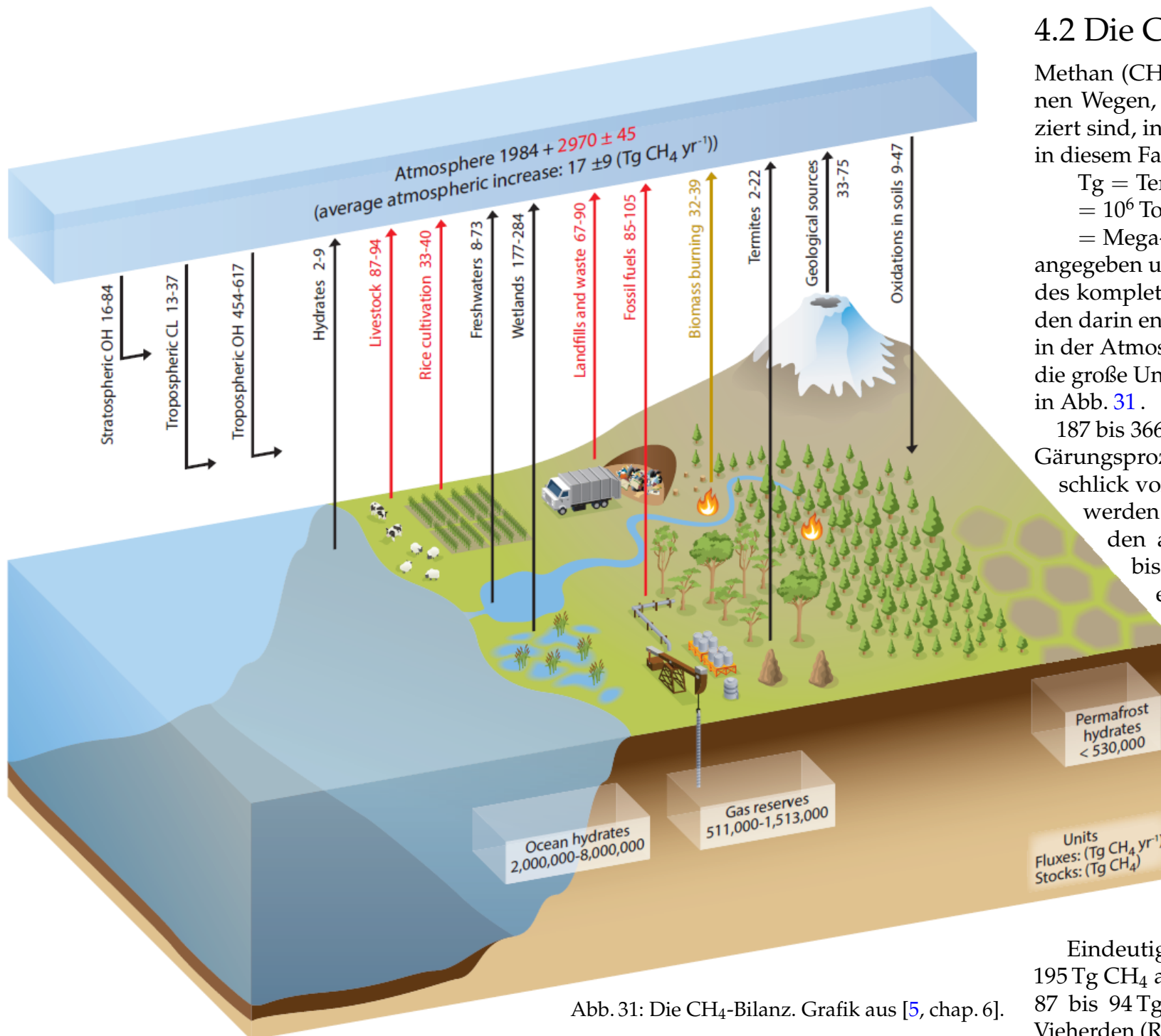


Abb. 31: Die CH₄-Bilanz. Grafik aus [5, chap. 6].

85 bis 105 Tg CH₄ die bei der Gewinnung von Öl und Erdgas weder aufgefangen noch abgepackelt werden, und 33 bis 40 Tg CH₄ die aus Reisfeldern ausgasen. Macht insgesamt 357 bis 434 Tg CH₄ aus Prozessen, die erst in der Neuzeit von Menschen in nennenswertem Volumen eingeführt wurden.

In der Atmosphäre reagieren OH⁻ Ionen und Chloride mit dem Methan, und wandeln es in weniger klimaschädliche Stoffe um. Dadurch verschwinden jährlich 483 bis 738 Tg CH₄ aus der Atmosphäre. Diese Prozesse würden völlig ausreichen um alle natürlichen CH₄-Quellen und auch noch das CH₄ aus verbrannter Biomasse zu kompensieren; deshalb gab es vor 1750 keinen Anstieg der CH₄-Konzentration in der Atmosphäre.

Nach der Abschätzung von Abb. 31 stieg die Menge von CH₄ in der Atmosphäre im Zeitraum 2000–2009 jährlich um durchschnittlich 17 ± 9 Tg an; das entspricht einem Anstieg der Konzentration von $17 \text{ ppb} / 2,75 \pm 9 \text{ ppb} / 2,75 = 6,18 \pm 3,3$ ppb. Tatsächlich war der gemessene Anstieg der Konzentration in diesem Zeitraum niedriger, nämlich nur etwa 2 ppb pro Jahr, siehe Abb. 12. In jenen Jahren war der Anstieg der CH₄-Konzentration aber ungewöhnlich niedrig.³¹ In jüngerer Zeit steigt die CH₄-Konzentration jährlich um etwa 9 ppb (siehe Abb. 12), was einer Zunahme von CH₄ in der Atmosphäre um $9 \text{ Tg} \cdot 2,75 \approx 25 \text{ Tg}$ jährlich entspricht.

Wir müssen also den jährlichen CH₄-Ausstoß um etwa 25 Tg verringern, um die klimaschädliche Wirkung zu vermeiden.

Vergleicht man dies Einsparziel mit den – von Menschen zu verantwor-

tenden – durchschnittlichen jährlichen Emissionen 2000–2009, nämlich

Verrottung in Müllkippen	152 bis 195 Tg CH ₄
wiederkäuende Vieherden (Rinder, Schafe)	87 bis 94 Tg CH ₄
Kollateralschaden bei Ölbohrungen	85 bis 105 Tg CH ₄
Reisanbau	33 bis 40 Tg CH ₄

dann sieht man dass die Verminderung um etwa 25 Tg CH₄ durchaus erreichbar sein sollte, ohne dass Einschränkungen beim Reisanbau oder bei der Viehhaltung³² erforderlich werden.

Anmerkung: Dies Ergebnis ist für mich eine Überraschung. Ich habe jahrelang geglaubt, dass Methan-rülpsende Rinder ein ernsthaftes Klimaproblem verursachen. Tatsächlich zeigt die genauere quantitative Bewertung aber, dass die Natur damit leicht zurechtkommt, wenn wir die erforderliche Reduktion von Methanemissionen bei der Müllentsorgung und bei der Gewinnung fossiler Energieträger zustande bringen.

4.3 Die N₂O-Bilanz

N₂O entsteht auf sehr unterschiedliche Weise in einer Reihe mehr oder weniger verwickelter Reaktionen, an denen Stickstoff beteiligt ist. Auf der nächsten Seite ist in Abb. 32 nur sehr oberflächlich schematisiert angegeben, aus welchen Quellen letztlich N₂O in die Atmosphäre gelangt, über welche Umwandlungen stickstoffhaltiger Moleküle auch immer. Welches diese komplexen Umwandlungsprozesse im Einzelnen sind, wird in [5, chap. 6 sec. 6.1.3.1] beschrieben.

³¹ Die Wissenschaftler sind sich nicht einig, wie das erklärt werden kann.

³² Die riesigen weltweiten Viehbestände verursachen noch eine Menge anderer Probleme als nur Methan-Rülpsen. Eine Reduktion der Viehbestände könnte deshalb durchaus notwendig sein, aber nicht wegen dem CH₄-Problem.

Die Einheit der in Abb. 32 angegebenen Werte ist

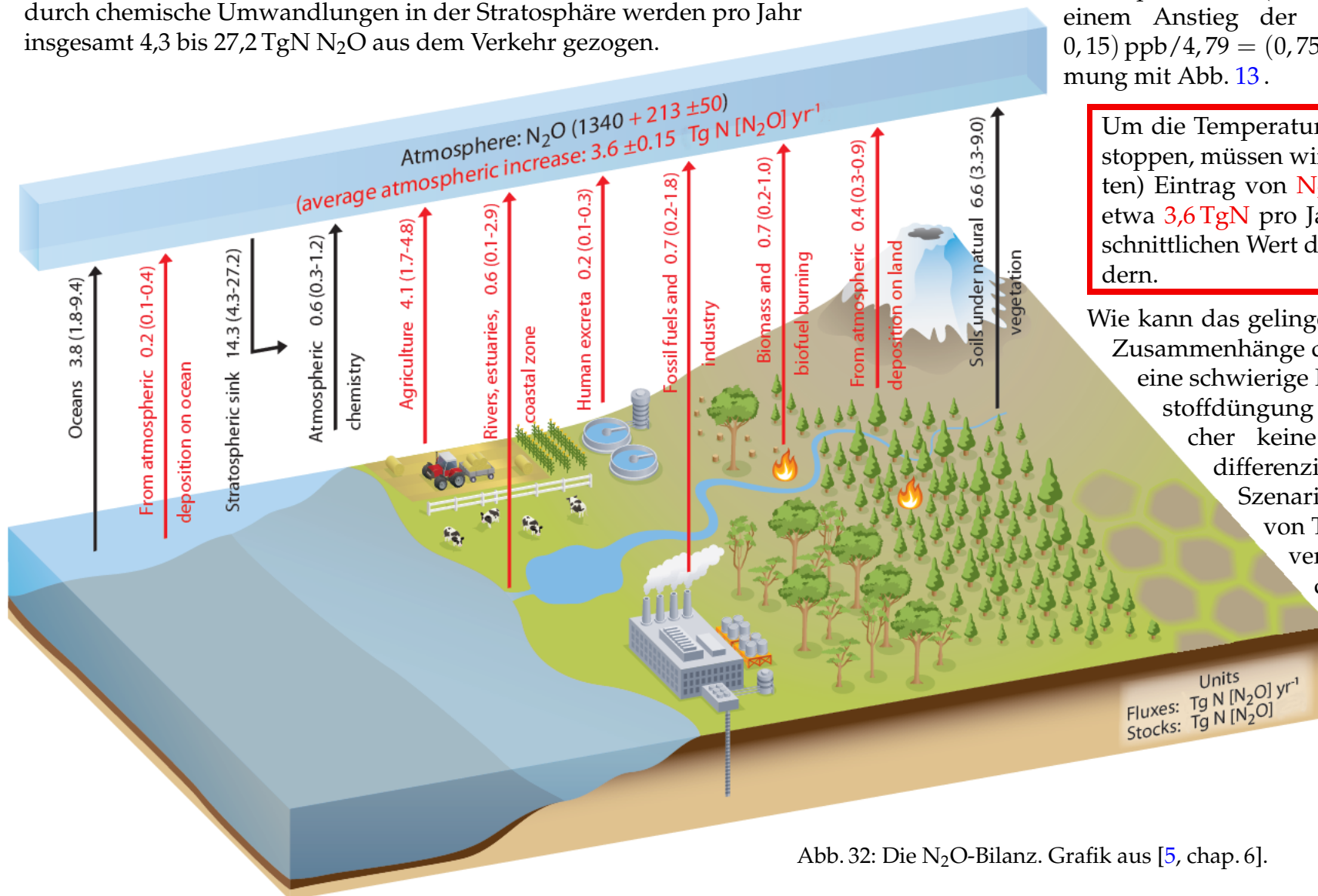
Tg = Tera-Gramm = 10^{12} Gramm = 10^6 Tonnen =
= Millionen Tonnen = Mega-Tonnen = Mt

Das N bei TgN zeigt an, dass die Werte sich nur auf das Gewicht der beiden Stickstoff-Atome im N_2O -Molekül beziehen; das Sauerstoff-Atom wird nicht mitgerechnet. 1 ppb N_2O in der Atmosphäre wiegt 4,79 TgN.

Aus den in Abb. 32 schwarz eingetragenen natürlichen Quellen gelangen pro Jahr insgesamt 5,4 bis 45,6 TgN N_2O in die Atmosphäre. Und durch chemische Umwandlungen in der Stratosphäre werden pro Jahr insgesamt 4,3 bis 27,2 TgN N_2O aus dem Verkehr gezogen.

Von Menschen werden zusätzlich (rote Zahlen in Abb. 32) 2,7 bis 12,1 TgN N_2O (auf mehr oder weniger indirekte Weise) in die Atmosphäre eingebracht. Mit Abstand wichtigster Verursacher ist dabei mit 1,7 bis 4,8 TgN N_2O die Landwirtschaft. Hier wirkt sich die Stickstoff-Düngung der Felder aus.

Die große Unsicherheit bei den Zahlenangaben ist auffällig. Tatsächlich gab es in den Jahren 2000–2009 pro Jahr eine Zunahme des N_2O in der Atmosphäre von $(3,6 \pm 0,15)$ TgN. Das entspricht einem Anstieg der Konzentration um $(3,6 \pm 0,15)$ ppb/ $4,79 = (0,75 \pm 0,03)$ ppb, in Übereinstimmung mit Abb. 13.



Um die Temperaturerhöhung auf der Erde zu stoppen, müssen wir den (direkten und indirekten) Eintrag von N_2O in die Atmosphäre um etwa 3,6 TgN pro Jahr gegenüber dem durchschnittlichen Wert der Jahre 2000–2009 vermindern.

Wie kann das gelingen? Wegen der verwickelten Zusammenhänge der Stickstoff-Chemie ist dies eine schwierige Frage. Der Verzicht auf Stickstoffdüngung in der Landwirtschaft ist sicher keine akzeptable Option. Eine differenzierte Diskussion möglicher Szenarien, mit denen die Emission von Treibhausgasen auf ein klimaverträgliches Maß reduziert werden kann, findet man im Report SR15 [12, chap.2] des IPCC.

Abb. 32: Die N_2O -Bilanz. Grafik aus [5, chap. 6].

5. (Wie) Kann der Klimawandel gestoppt werden?

5.1 Der globale Temperaturanstieg

Im Dezember 2015 verpflichteten sich 195 Staaten (darunter Deutschland) auf der Pariser Klimakonferenz der Vereinten Nationen dazu, den weltweiten Temperaturanstieg auf maximal 2 °C, nach Möglichkeit aber auf maximal 1,5 °C, gegenüber dem vorindustriellen Level³³ zu begrenzen. [25]

Um bei der Ermittlung der aktuellen Oberflächentemperatur der Erde natürliche Schwankungen (beispielsweise ausgelöst durch den Sonnenzyklus oder große Vulkanausbrüche) auszumitteln, wird die mittlere globale Temperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt als Mittelwert einer 30 Jahre langen, um diesen Zeitpunkt zentrierten Periode definiert.³⁴ [12, sec. 1.2.1]

Die so gemittelte globale Temperatur war in 2017 um 1.0 °C (likely between 0.8 °C and 1.2 °C) höher als in der vorindustriellen Zeit, und sie stieg in 2017 mit einer Geschwindigkeit von 0.2 °C (likely between 0.1 °C and 0.3 °C) pro Jahrzehnt an (*high confidence*¹¹) [12, sec. 1.2.1.3 and executive summary].

Die Wissenschaftler des IPCC sind überzeugt, dass mit dieser 30-Jahre-Mittelung alle natürlichen Klimaschwankungen *vollständig* ausgemittelt wurden, so dass der genannte Temperaturanstieg *ausschließlich* auf die von Menschen veranstaltete Emission von Treibhausgasen³⁵ und Aerosolen zurückzuführen ist. [12, sec. 1.2.1.3 and executive summary]

5.2 Erwärmung um 2 °C oder um 1.5 °C ?

Die Teilnehmer der Pariser Klimakonferenz 2015 waren unsicher, ob die Erderwärmung auf 1.5 °C begrenzt werden muss, oder ob eine 2 °C Grenze ausreicht. Das erkennt man an der etwas vagen Formulierung „maximal 2 °C, nach Möglichkeit aber maximal 1,5 °C“, auf die sie sich schließlich geeinigt haben. Um künftig solidere Entscheidungsgrundlagen zu haben, erteilte die Konferenz dem IPCC den Auftrag, die Implikationen beider Grenzen genauer zu untersuchen und zu vergleichen.

Knapp drei Jahre später veröffentlichten die Wissenschaftler des IPCC das Ergebnis [12] dieser Untersuchung. Hier nur zwei Statements aus ihrem Report [12, chap. 3, executive summary]:

- * *Climate models project robust differences in regional climate between present-day and global warming up to 1.5 °C, and between 1.5 °C and 2 °C (*high confidence*¹¹), depending on the variable and region in question (*high confidence*¹¹). Large, robust and widespread differences are expected for temperature extremes (*high confidence*¹¹). Regarding hot extremes, the strongest warming is expected to occur at mid-latitudes in the warm season (with increases of up to 3 °C for 1.5 °C of global warming, i.e., a factor of two) and at high latitudes in the cold season (with increases of up to 4.5 °C at 1.5 °C of global warming, i.e., a factor of three) (*high confidence*¹¹).³⁶*
- * *Risks of local species losses and, consequently, risks of extinction are much less in a 1.5 °C versus a 2 °C warmer world (*high confidence*¹¹). The number of species projected to lose over half of their climatically determined geographic range at 2 °C global warming*

³³ Weil es in der vorindustriellen Zeit keine regelmäßigen oder gar global repräsentativen Temperaturmessungen gab, gilt per Definition [12, sec. 1.2.1] der Mittelwert der Temperatur in den 51 Jahren 1850–1900 als „vorindustrieller Level“.

³⁴ Wenn man die Erdtemperatur für ein Datum das weniger als 15 Jahre zurückliegt (z. B. das Jahr 2018) berechnen will, muss man das Mittelungs-Verfahren natürlich sinngemäß abwandeln.

³⁵ Das sind die in den Grafiken 27, 31 und 32 in roter Farbe eingetragenen Emissionen. Dazu gehört *nicht* das von Menschen ausgeatmete CO₂.

³⁶ Der zweite Teil dieses Absatzes enthält offenbar keinen Vergleich zwischen 1.5 °C und 2 °C globaler Erwärmung, sondern den Hinweis dass die scheinbar harmlose Größe 1.5 °C stark täuschen kann, weil die regionalen Temperaturänderungen ein mehrfaches davon betragen.

(18 % of insects, 16 % of plants, 8 % of vertebrates) is projected to be reduced to 6 % of insects, 8 % of plants and 4 % of vertebrates at 1.5 °C warming (*medium confidence*¹¹). Risks associated with other biodiversity-related factors, such as forest fires, extreme weather events, and the spread of invasive species, pests and diseases, would also be lower at 1.5 °C than at 2 °C of warming (*high confidence*¹¹).

Der Report enthält eine große Menge ähnlich nachdrücklicher Warnungen. Ich kann mir nicht vorstellen dass irgend ein Leser, der diese – von seriösen Wissenschaftlern zusammengestellten – Prognosen sorgfältig gelesen hat, noch daran zweifeln wird, dass wir wirklich die allergrößten Anstrengungen unternehmen müssen um die Erwärmung der Erde auf maximal 1,5 °C zu begrenzen, und eine Erwärmung um 2 °C (oder gar noch mehr) abzuwenden.

5.3 Das verbleibende CO₂-Budget

Der Temperaturanstieg auf der Erde wird zwar von einem breiten Spektrum von Treibhausgasen und Aerosolen bestimmt, das bei weitem wichtigste ist aber Kohlendioxid. Änderungen der Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre spiegeln sich fast linear in der Änderung der Oberflächentemperatur der Erde wieder. Nach Abb. 22 war das zu erwarten, und in Abb. 33 ist das deutlich erkennbar. Man beachte die unterschiedlich aufgespreizten Zeitskalen in Abb. 33. Die farbigen Linien ganz rechts zeigen die Ergebnisse von Modellrechnungen mit unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen. (Man lasse sich nicht davon täuschen, dass es schon mal so hohe CO₂-Konzentrationen und so hohe Temperaturen auf der Erde gegeben hat, wie sie der Menschheit in den kommenden Jahrhunderten drohen. Das war vor Millionen von Jahren. Menschen leben auf der Erde erst seit 200 000 Jahren.)

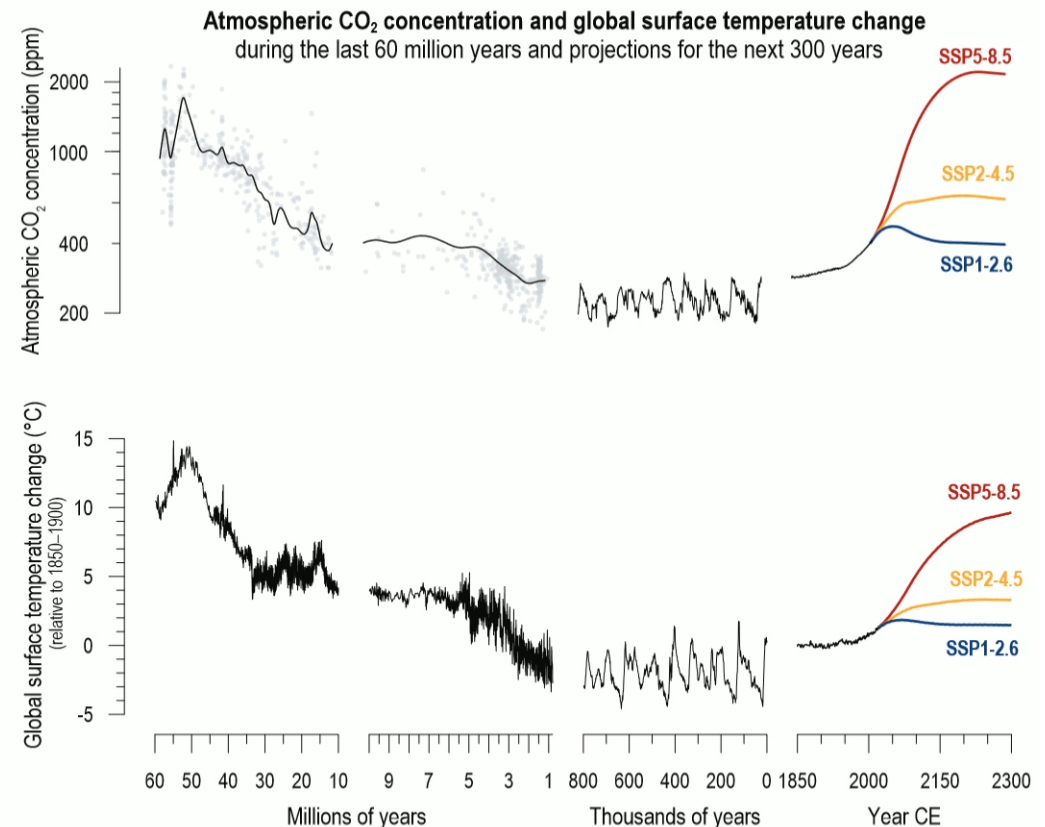


Abb. 33: Der Zusammenhang von CO₂ in der Atmosphäre und der Oberflächentemperatur der Erde. Grafik aus [17, fig. TS.1].

Wenn wir es tatsächlich schaffen sollten den CO₂-Anstieg zu stoppen, dann bleibt ja immer noch die erhöhte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, die wir seit Beginn der Industrialisierung aufgebaut haben. Wird die CO₂-Konzentration auf natürliche Weise wieder auf ihren vorindustriellen Wert sinken?

Das wird sie, aber nur langsam. Im Assessment Report 5 des IPCC steht dazu: *The removal of human-emitted CO₂ from the atmosphere by natural processes will take a few hundred thousand years (high confidence¹¹). [...] This very long time required by sinks to remove anthropogenic CO₂ makes climate change caused by elevated CO₂ irreversible on human time scale.* [5, chap. 6]

In [5, chap. 6 sec. 5] werden mögliche Methoden beschrieben, wie man mit technischen Mitteln den überhöhten CO₂-Gehalt der Atmosphäre schneller senken könnte. Die Wissenschaftler des IPCC kommentieren diese Ideen allerdings eher skeptisch:

Unconventional ways to remove CO₂ from the atmosphere on a large scale are termed Carbon Dioxide Removal (CDR) methods. CDR could in theory be used to reduce CO₂ atmospheric concentrations but these methods have biogeochemical and technological limitations to their potential. Uncertainties make it difficult to quantify how much CO₂ emissions could be offset by CDR on a human time scale, although it is likely¹¹ that CDR would have to be deployed at large-scale for at least one century to be able to significantly reduce atmospheric CO₂. In addition, it is virtually certain¹¹ that the removal of CO₂ by CDR will be partially offset by outgassing of CO₂ from the ocean and land ecosystems.

The level of confidence on the side effects of CDR methods on carbon and other biogeochemical cycles is low¹¹. [5, chap. 6]

Die Unumkehrbarkeit des einmal erreichten Levels von CO₂ in der Atmosphäre ist der Grund, warum wir das Problem nicht vor uns her schieben können. Wenn das CO₂, das die globale Temperatur um mehr als 1,5 °C in die Höhe treibt, erst einmal in der Atmosphäre ist, dann werden wir es „on human time scale“ nicht mehr los, falls wir nicht auf die vage Möglichkeit wesentlich verbesserter CDR-Verfahren spekulieren wollen.

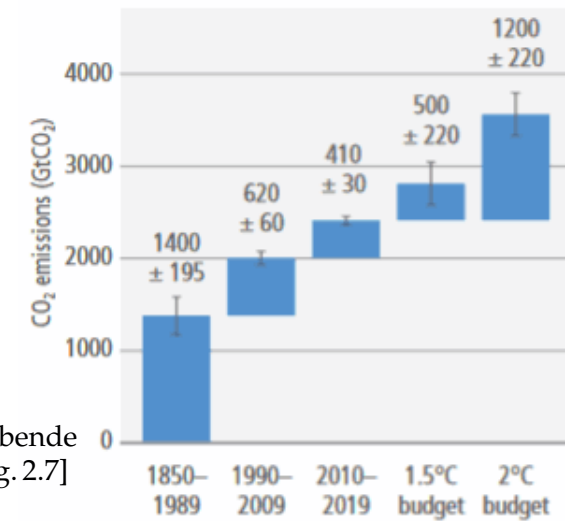


Abb. 34: CO₂-Emission in der Vergangenheit und das verbleibende CO₂-Budget, Grafik aus [26, fig. 2.7]

Es bleibt also nur ein begrenztes Budget von CO₂, das wir in den kommenden Jahren noch in die Luft blasen dürfen, bevor die 1,5 °C-Grenze (oder gar die 2 °C-Grenze) überschritten wird. In Abb. 34 wird dieses verbleibende Budget dargestellt. Man beachte die große Unsicherheit von ±200 Gigatonnen CO₂.

Um das 1,5 °C-Limit nicht zu reißen, dürfen wir also, beginnend von 2020, insgesamt nochmals etwa gleich viel CO₂ emittieren wie in der gesamten Periode 2010–2019.

5.4 Werden wir das 1,5 °C-Ziel erreichen?

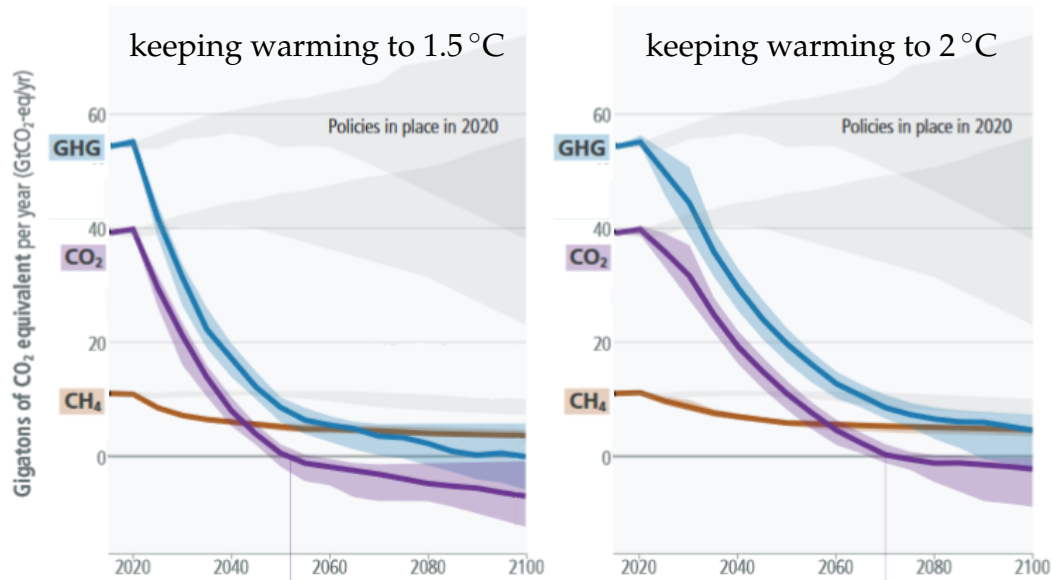


Abb. 35: Szenarien für die Reduktion von Treibhausgasen, Grafik aus [18, fig. 3.6]

Modell-Szenarien für die Reduktion der Emissionen von CO₂, CH₄, und der Gesamtheit aller Treibhausgase (GHG = GreenHouseGases), mit denen der Temperaturanstieg auf 1,5 °C bzw. 2 °C begrenzt werden könnten, werden in Abb. 35 mit den Reduktionen verglichen, die von den Regierungen angekündigt wurden, oder mit deren Implementierung bereits begonnen wurde (die grau schattierten Bereiche „policies in place 2020“). Rechts oben ist zum Vergleich nochmal Abb. 29 mit der *tatsächlichen* Entwicklung der CO₂-Emission abgedruckt. Man sieht deutlich dass wir mit dem bisher eingeschlagenen Tempo noch nicht einmal die Begrenzung der Erwärmung auf 2 °C schaffen werden.

Interessant ist, dass die beiden Modell-Szenarien künftig negative CO₂-Emissionen annehmen. Damit ist gemeint, dass durch menschengemachte Maßnahmen wie z. B. die Aufforstung von Steppen oder die Renaturierung von Mooren mehr CO₂ aus der Atmosphäre entfernt wird, als durch menschliche Aktivitäten wie z. B. die Verbrennung fossiler Energieträger in sie hineingeblasen wird.

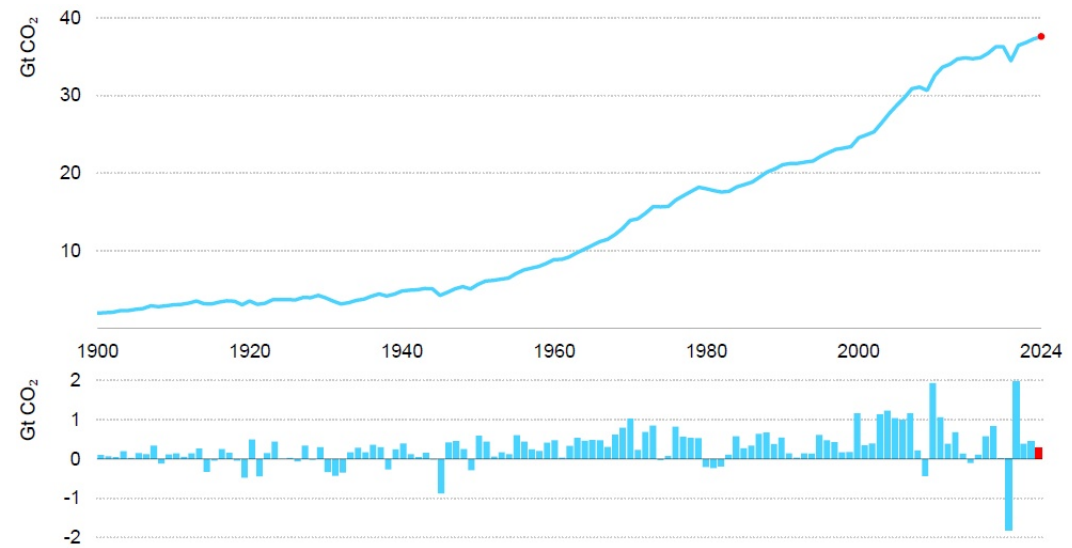


Abb. 29: Globale jährliche Emission von CO₂ aus Verbrennung fossiler Energieträger. Grafik aus [23].

5.5 Sollten wir aufgeben?

Der Vergleich von Abb. 35 und Abb. 29 ist wirklich überaus deprimierend. Aufgeben sollten wir trotzdem nicht, denn eine globale Erwärmung um beispielsweise 3 °C wäre zwar fürchterlich, aber immer noch weniger schlimm als eine Erwärmung um beispielsweise 5 °C. Und eine Erwärmung um 5 °C wäre immer noch weniger schlimm als eine Erwärmung um beispielsweise 7 °C. Irgendwann wird die Menschheit ganz gewiss zur Einsicht kommen, und die Aufheizung der Erde stoppen. Je früher wir zur Vernunft kommen, um so weniger unerträglich wird das Leben künftiger Generationen auf diesem Planeten sein.

Das IPCC hat zuletzt in seinem Report [26] eine Fülle möglicher Maßnahmen beschrieben, und ihre jeweilige Wirksamkeit diskutiert, mit denen der Anstieg der Temperatur auf der Erde begrenzt werden kann. Es liegt an uns, diese Vorschläge *endlich* zu realisieren.

Quellen

- [1] National Oceanic & Atmospheric Administration, USA: *Global Time Series* <https://www.nci.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>
- [2] World Glacier Monitoring Service: *Global Glacier State* <https://wgms.ch/global-glacier-state/>
- [3] E. J. O. Schrama, B. Wouters, R. Rietbroek : *A mascon approach to assess ice sheet and glacier massbalances and their uncertainties from GRACE data* , J. Geophys. Res. Solid Earth **119**, 6048 – 6066 (2014), <https://doi.org/10.1002/2013JB010923>
- [4] Grafik des GFZ (Geoforschungszentrum) Potsdam <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/earth-system-modelling/topics/solid-earth-dynamics/glazial-isostatic-adjustment-gia/>
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* , Assessment Report 5 , (2013), <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- [6] Messkurven und Grafiken der Climate Change Initiative der European Space Agency <http://cci.esa.int/>
- [7] Messkurven und Grafiken der Global Monitoring Division , National Oceanic & Atmospheric Administration, USA <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/>
- [8] United States Environmental Protection Agency (EPA): *Atmospheric Concentrations of Greenhouse Gases* , <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>
Es handelt sich um Zusammenstellungen von Daten verschiedener Forschungsgruppen. Die Quellen sind auf dieser Website ganz unten aufgelistet.
- [9] J. E. Dore, R. Lukas, D. W. Sadler, M. J. Church, D. M. Karl : *Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific* , PNAS **106**, 12235 – 12240 (2009), <https://doi.org/10.1073/pnas.0906044106>
- [10] Umweltbundesamt : *Klimawandel und Marine Ökosysteme* (2009), <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3805.pdf>
- [11] UN Convention on Biological Diversity (ed.) : *An Updated Synthesis of the Impacts of Ocean Acidification on Marine Biodiversity* (2014), <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-75-en.pdf>
- [12] Intergovernmental Panel on Climate Change : *Global Warming of 1.5 °C* , Special Report , (2018), <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- [13] K. E. Trenberth, J. T. Fasullo, J. Kiel : *Earth's global energy budget* , Bull. Am. Met. Soc. **90**, 311 – 323 (2009), <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>
- [14] Anonymer Autor : *Plancksches Strahlungsspektrum* , https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlackbodySpectrum_loglog_de.svg
- [15] Johann Wolfgang Goethe : *Zur Farbenlehre* (Cotta, Tübingen, 1810) http://www.deutschestextarchiv.de/book/show/goethe_farbenlehre01_1810
- [16] R. A. Rohde : *Spektren der Treibhausgase* , https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission.png
Die Grafik wurde für diesen Artikel erheblich bearbeitet.
- [17] Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* , Assessment Report 6 , (2021), <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [18] Intergovernmental Panel on Climate Change : *Climate Change 2023: Synthesis Report* , Assessment Report 6 , (2023), <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

- [19] S. Arrhenius: *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*, Phil. Mag. Series 5, **41**, 237 – 276 (1896), https://zs.thulb.uni-jena.de/rsc/viewer/jportal_derivate_00165237/PMS_1896_Bd41_245.tif
- [20] Q. Cai, X. Yan, Y. Li, et al.: *Global patterns of human and livestock respiration*, Sci. Rep. **8**, 9278 (2018), <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27631-7>
- [21] Y. T. Prairie, C. M. Duarte: *Direct and indirect metabolic CO₂ release by humanity*, Biogeosci. **4**, 215 – 217 (2007), <https://doi.org/10.5194/bg-4-215-2007>
- [22] T. Boden, G. Marland, R. J. Andres: *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions (1751 - 2014)*, CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, USA https://doi.org/10.3334/CDIAC/00001_V2017
- [23] International Energy Agency: *Global Energy Review 2025*, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>
- [24] CO₂-Abscheidung und -Speicherung, Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/CO2-Abscheidung_und_-Speicherung
- [25] UN Climate Change Conference 21: *Action taken by the Conference*, <https://unfccc.int/documents/9097>
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, Assessment Report 6, (2022), <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>