

## Die Erwärmung der Erde ist eindeutig

Peter Lemke

Alfred-Wegener-Institut

Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

(Stand: Oktober 2019)

Der heutige Zustand des Erdklimas ist das Ergebnis einer lang andauernden, kontinuierlichen Entwicklung: ein Schnappschuss aus einem rund 4,5 Milliarden Jahre andauernden Film der Entwicklung der Erde, der immer noch weiterläuft. Dokumentiert werden Klimaschwankungen durch geologische Befunde (marine Sedimentkerne: mehrere Millionen Jahre; Eiskerne: 800.000 Jahre), durch Baumringe (10.000 Jahre), historische Aufzeichnungen (1000 Jahre) und durch moderne Messinstrumente (z.B. Thermometer und Barometer, 250 Jahre).

Aus diesen Daten ergibt sich als charakteristische Eigenschaft des Klimas seine ausgeprägte Variabilität, die sich auf Zeitskalen von Monaten bis zu Jahrtausenden erstreckt. Kurzfristige Variationen von einigen Tagen innerhalb der Atmosphäre gestalten unser Wetter, während langfristige Veränderungen der uns umgebenden Atmosphäre auf Zeitskalen von einem Monat und mehr als Klimaschwankungen gelten. Die Ursachen von Klimaschwankungen sind aber nicht nur in der Atmosphäre zu suchen, sondern kommen durch die Wechselwirkung der Atmosphäre mit den trägen Komponenten des Klimasystems (Ozean, Eis, Biosphäre) und durch externe Anregungen zustande (Abb. 1). Dabei spielt die Gaszusammensetzung der Luft eine wichtige Rolle. Wasserdampf und Kohlendioxid in der Atmosphäre sorgen für den weitaus größten Teil des natürlichen Treibhauseffekts, der die Temperatur an der Erdoberfläche von lebensfeindlichen  $-18^{\circ}\text{C}$  auf angenehme  $+15^{\circ}\text{C}$  erhöht. Änderungen dieser Gasbestandteile der Luft werden daher Klimaänderungen hervorrufen.

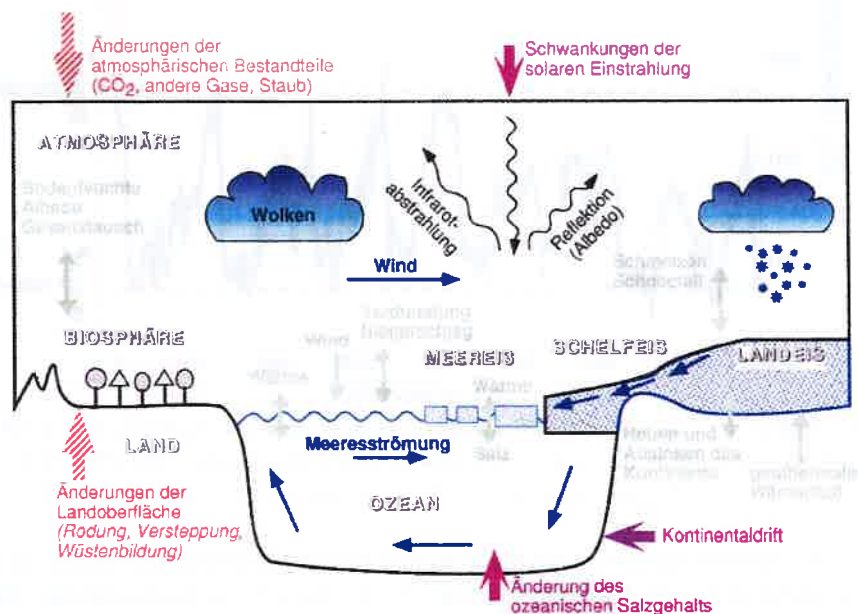


Abb. 1: Schematische Darstellung des Klimasystems. Die dünnen schwarzen bzw. blauen Pfeile stellen Strahlungs- bzw. Bewegungsvorgänge dar. Die grünen Pfeile deuten Wechselwirkungen im Klimasystem an. Die fetten Pfeile geben Veränderungen der äußeren Randbedingungen wieder, wobei die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf das Klimasystem schraffiert dargestellt sind.

Der Zustand des Klimasystems, seine Auswirkungen auf Natur und menschliche Gesellschaftssysteme und Möglichkeiten der politischen Gegensteuerung werden regelmäßig vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) untersucht. Sein Fünfter Sachstandsbericht erschien in drei Bänden 2013/2014. In den Jahren 2018 und 2019 wurden vom IPCC herausgegeben: Sonderbericht 1.5°C Globale Erwärmung (SR15), Sonderbericht Klimawandel und Land-systeme (SRCCL) und Sonderbericht Ozean und Kryosphäre (SROCC) (siehe <http://www.ipcc.ch>). Der Sechste Sachstandsbericht wird 2021 veröffentlicht.

### Ursachen der gegenwärtigen Klimaänderungen

Der Kohlendioxid-Gehalt der Luft hat seit 1750 um 46% von 280 ppm auf 409 ppm im Jahr 2018 zugenommen. Die Zuwachsrate der letzten 10 Jahre ist die größte seit 50 Jahren. Der heutige CO<sub>2</sub>-Wert ist bei weitem der größte in den letzten 800.000 Jahren, wie Messungen von Lufteinschlüssen in Eiskernen aus dem Antarktischen Eisschild zeigen (siehe Abb. 2). In den Kaltzeiten betrug der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft etwa 180 ppm und in den Warmzeiten 280 ppm. Im Jahr 2018 betrug dieser Wert 409 ppm, und das stellt die Ursache unseres Klimaproblems dar. Durch Nutzung fossiler Energieträger hat die Menschheit den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft in den vergangenen 60 Jahren um 100 ppm erhöht, was dem Übergang von einer Kaltzeit zur Warmzeit entspricht, der aber 20.000 Jahre dauerte.

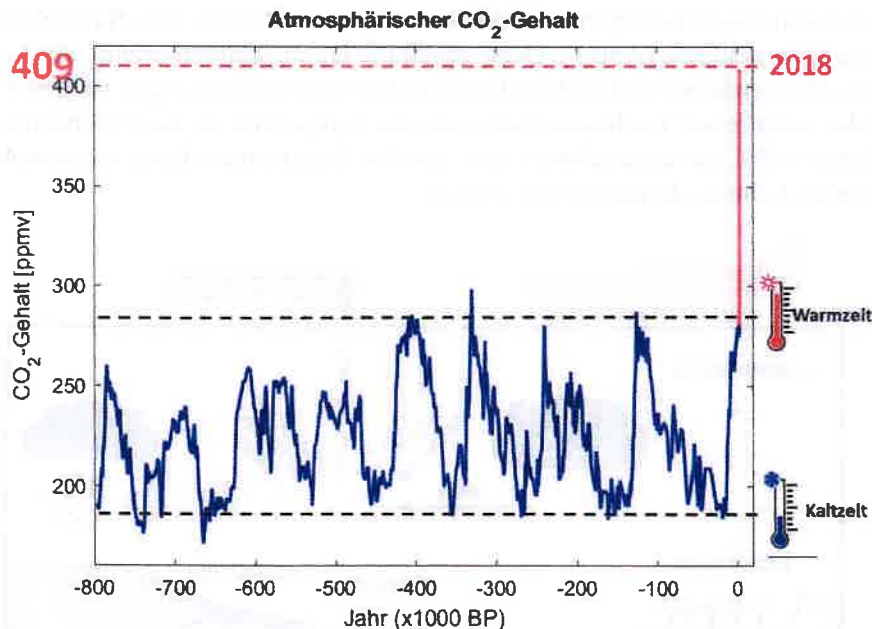
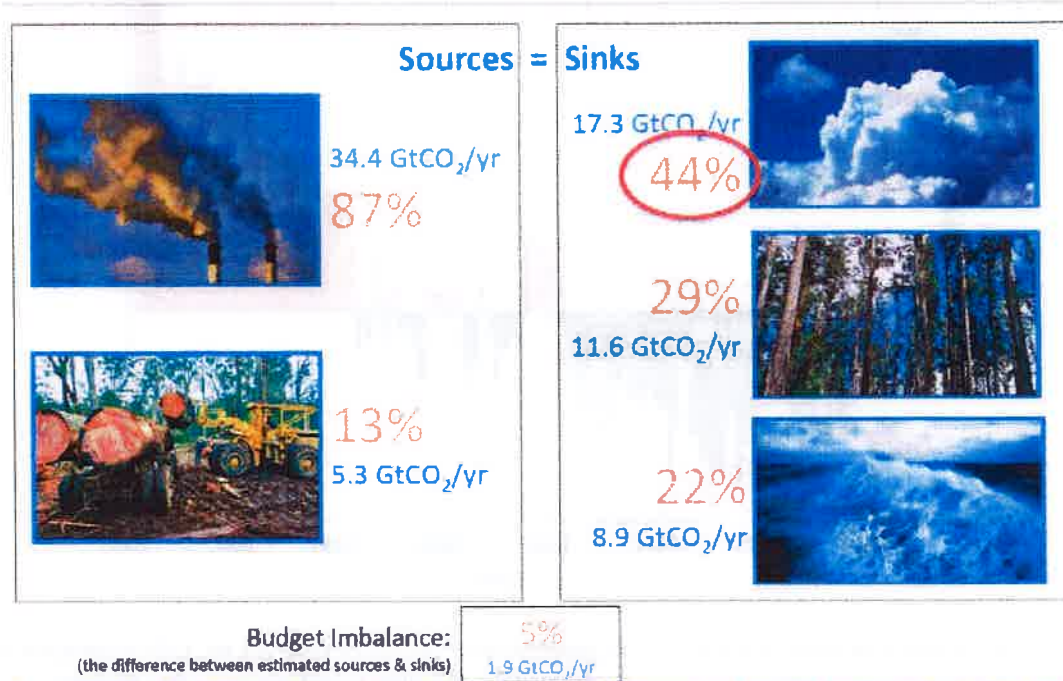


Abb. 2: CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft seit 800.000 Jahren, ermittelt aus Lufteinschlüssen im EPICA Dome C (Antarktische) Eiskern (blau, Lüthi, D. et al., 2008) und direkten Messungen von Luftproben (seit 1958, rot, Datenquelle: [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)).

87% der CO<sub>2</sub>-Erhöhung gehen auf die Nutzung fossiler Brennstoffe zurück und 13% auf Landnutzungsänderungen (z.B. Rodungen) (Abb. 3). An diese hohe Emissionsrate kann sich das Erdsystem (im Wesentlichen Biosphäre und Ozean) nicht anpassen, deswegen verbleiben 44% der Emissionen in der Atmosphäre und erhöhen damit den natürlichen Treibhauseffekt beträchtlich. Es wird wärmer, und wir steuern vermutlich auf eine Superwarmzeit zu. 29% der Emissionen nimmt die Biosphäre auf (Düngungseffekt durch den höheren CO<sub>2</sub> Gehalt) und 22 % der Ozean, der dadurch eine Versauerung erfährt, mit starken Konsequenzen für das marine Ökosystem.

## Fate of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions (2008–2017)



Source: CDIAC; NOAA-ESRL; Houghton and Nassikas 2017; Hansis et al 2015; Le Quéré et al 2018; Global Carbon Budget 2018

Abb. 3: Aufnahme des anthropogen emittierten CO<sub>2</sub> im Erdsystem (Ozean, Biosphäre, Atmosphäre).

Andere wichtige Treibhausgase wie z.B. Methan und Lachgas, deren Konzentrationen seit 1750 auch stark zugenommen haben, machen zusammen etwas mehr als halb so viel aus wie der CO<sub>2</sub>-Anstieg, da sie einen prozentual deutlich geringeren Anteil an der Zusammensetzung der Luft haben. Die für Klimaänderungen verantwortlichen Änderungen der Strahlungsbilanz werden daher vorwiegend durch Kohlendioxid verursacht. Das wichtigste Treibhausgas – der Wasserdampf – wird vom Menschen nicht direkt verändert. Zudem kann der Wasserdampfgehalt der Luft nicht beliebig zunehmen. Wird der Sättigungswert erreicht, dann regnet es. Daher spielt er für den gegenwärtigen Temperaturtrend keine wichtige Rolle. Allerdings wird der Wasserdampf in Zukunft eine Verstärkerrolle einnehmen, da sich sein Sättigungswert in der Luft mit steigender Temperatur erhöht. Änderungen der solaren Einstrahlung haben zurzeit nur einen minimalen Einfluss.

### Beobachtungen der Klimaänderungen

Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig. Die globale Oberflächentemperatur ist seit 1880 um etwa 1,0°C gestiegen. Der Trend der letzten 60 Jahre (0,15 °C/Dekade) ist doppelt so groß wie der Trend der letzten 140 Jahre (0,07 °C/Dekade), und die vergangenen 5 Jahre waren die wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen (Abb. 4). Inzwischen stellen die Jahre 2001 bis 2010 die wärmste Dekade und 2016 das wärmste Jahr seit Beginn der Messungen dar. Die Arktis hat sich doppelt so stark erwärmt wie die Erde im globalen Mittel. Die Häufigkeit heftiger Niederschläge hat zugenommen.

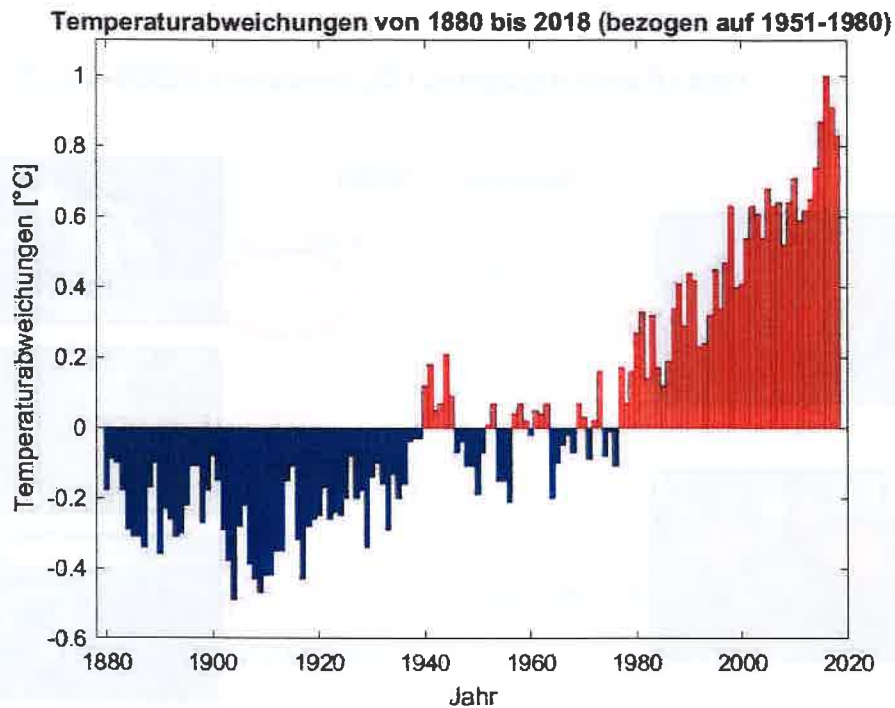


Abb. 4: Global gemittelte Anomalien der Lufttemperatur an der Erdoberfläche. (Abweichungen vom Mittelwert der Jahre 1951-1980; Datenquelle: GISS, <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>).

Rekonstruierte Daten aus Beobachtungen und anderen Quellen, wie z. B. Baumringdaten, deuten darauf hin, dass die Temperaturen der letzten 30 Jahre sehr wahrscheinlich höher waren als jemals zuvor in den vergangenen 800 Jahren und wahrscheinlich höher als in den vergangenen 1.400 Jahren.

Die schneebedeckte Fläche auf der Nordhemisphäre hat im März und April seit 1967 um etwa 9% abgenommen. Weltweit schrumpfen die Gletscher und tragen gegenwärtig mit 0,9 mm pro Jahr zum Meeresspiegelanstieg bei. Das Meereis verzeichnet in der Arktis seit 1978 einen Rückgang im Jahresmittel um 15% und im Sommer um 50% (Abb. 5). Grund für den starken Rückgang im Sommer ist die immer dünner werdende Meereisdecke. In der Antarktis ist bisher kein signifikanter Rückgang zu erkennen. Die Temperaturen in den oberen Schichten des Permafrostbodens haben sich seit 1980 um 3°C erwärmt, und die Ausdehnung des saisonal gefrorenen Bodens hat seit 1900 um 7% abgenommen, im Frühling sogar um 15%.

Die Ozeane sind im globalen Mittel wärmer geworden, bis zu Tiefen von 3000 m. Diese Erwärmung hat zum Anstieg des Meeresspiegels beigetragen. Der Meeresspiegel ist im 20. Jahrhundert um 17 cm angestiegen. Von 2005 bis 2017 betrug der Meeresspiegelanstieg durchschnittlich etwa 3,5 mm pro Jahr. Davon ist mehr als die Hälfte verursacht durch das Schmelzwasser schrumpfender Eismassen auf den Kontinenten (Gletscher 0,9 mm/Jahr; Grönländischer Eisschild: 0,8 mm/Jahr, Antarktischer Eisschild 0,5 mm/Jahr). Also liegt der Schmelzwasseranteil insgesamt bei 2,2 mm/Jahr. Die Differenz zum beobachteten Anstieg von 3,5 mm/Jahr geht auf die Ausdehnung des Meerwassers durch die Erwärmung und auf Änderungen im Wasserhaushalt der Kontinente zurück (Grundwasser, Talsperren, etc.).



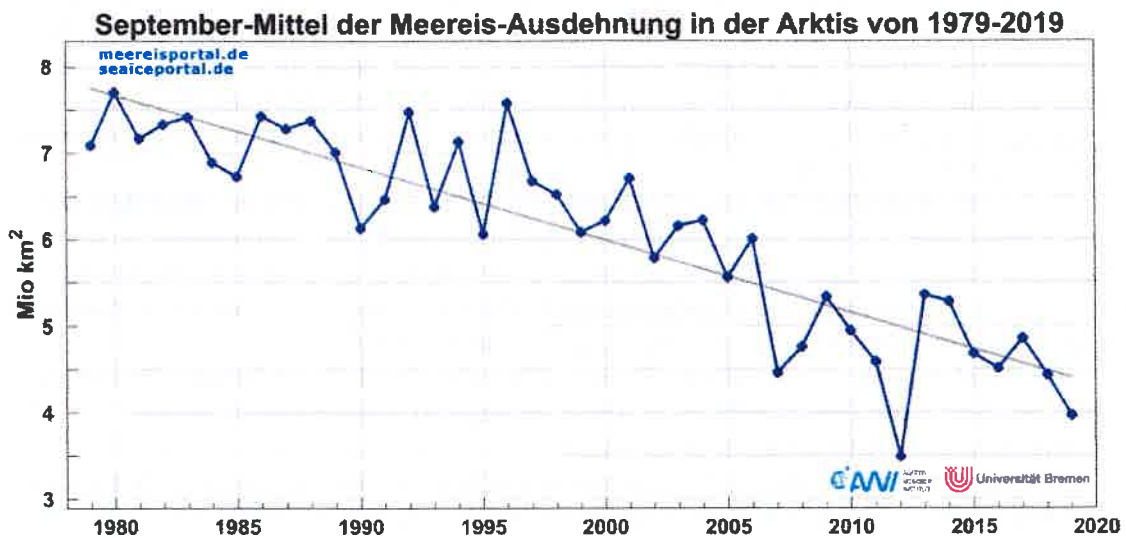


Abb. 5: Rückgang der sommerlichen Meereisausdehnung in der Arktis.

Änderungen der meridionalen Umwälzbewegung im Atlantik (oft vereinfacht aber unzutreffend als "Golfstrom" bezeichnet) können aus den vorliegenden Daten nicht abgeleitet werden.

### Projektionen

Klimamodelle wurden in den vergangenen Jahren deutlich verbessert, und sie stellen sicherlich eines der besten Vorhersagewerkzeuge unserer Gesellschaft dar. Die Modelle geben die beobachteten Muster der Erdoberflächentemperatur und ihre Trends über viele Dekaden im kontinentalen Maßstab wieder, einschließlich der stärkeren Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts und der unmittelbar auf große Vulkaneruptionen folgenden Abkühlung. Diese Modellrechnungen und ihr Vergleich mit Beobachtungen zeigen, dass die Erwärmung der letzten 50 Jahre mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit im Wesentlichen durch anthropogene Treibhausgase (hauptsächlich Kohlendioxid) verursacht worden ist.

Klimaprojektionen für die nächsten 100 Jahre lassen sich daher überzeugend durch Klimamodelle simulieren, die mit Energienutzungsszenarien angetrieben werden. Solche Modelle sagen – je nach Energienutzung – eine weitere Temperaturerhöhung und einen Meeresspiegelanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts voraus. Für die letzten beiden Dekaden des 21. Jahrhunderts ist der wahrscheinlichste Wert der globalen Erwärmung für das niedrigste Szenario 1.6°C und für das höchste Szenario 4.3°C, bezogen auf den Zeitraum 1850-1900. Die größte Erwärmung findet dabei in hohen nördlichen Breiten statt. Für den Meeresspiegelanstieg ergeben sich dementsprechend 0,6m für das niedrigste und 0,8 m für das höchste Szenario, (bezogen auf 1850-1900).

Für die nächsten 2-3 Jahrzehnte hängt die projizierte Erwärmung nur wenig von den Annahmen über zukünftige Emissionen ab, und selbst bei einem sofortigen Ende aller Emissionen würde durch die Trägheit des Klimasystems ein weiterer Temperaturanstieg bis zu ca. 0.6°C erfolgen.

Die Projektionen für den Meeresspiegelanstieg haben einen engeren Bereich gegenüber früheren Berichten, vor allem durch bessere Genauigkeit bei der thermischen Ausdehnung, sind aber nicht wesentlich von den früheren verschieden. Auch nach vollständigem Ende der Emissionen wird der Meeresspiegel über viele Jahrhunderte ansteigen, bedingt durch weitere

Erwärmung des tiefen Ozeans. Allerdings gibt es eine erhebliche Unsicherheit hinsichtlich der weiteren Entwicklung des grönländischen und des antarktischen Eisschildes, hier kann ein höherer Beitrag zum zukünftigen Anstieg nicht ausgeschlossen werden. Modellergebnisse lassen den Schluss zu, dass eine dauerhafte Erwärmung deutlich über 3°C über Jahrhunderte zu einem vollständigen Abschmelzen des grönländischen Inlandeises führen würde, entsprechend einem Meeresspiegelanstieg um 7m.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Meridionale Umwälzbewegung im Atlantik je nach Energieszenario um 11-34% im 21. Jahrhundert abnehmen wird. Die Temperaturen in der Atlantischen Region werden dennoch zunehmen, da der Einfluss der globalen Erwärmung überwiegt. Es ist allerdings sehr unwahrscheinlich, dass es zu einem abrupten Zusammenbruch der Meridionalen Umwälzbewegung im Atlantik im 21. Jahrhundert kommt.

Der Niederschlag wird in höheren Breiten sehr wahrscheinlich zunehmen, während es in den Tropen und Subtropen (einschließlich der Mittelmeerregion) wahrscheinlich zu einer Verminderung des Niederschlags kommen wird.

Klimaänderungen werden sich in Zukunft deutlich bemerkbar machen. Es scheint, dass die Menschheit dabei ist, ein gigantisches Experiment mit der Erde zu beginnen, und es gibt gute Gründe, dem entschieden entgegenzusteuern. Die Menschheit hat noch gute Möglichkeiten, größere Änderungen zu verhindern. Eine Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf unter 2°C bis zum Jahr 2100 erscheint allerdings schwierig.

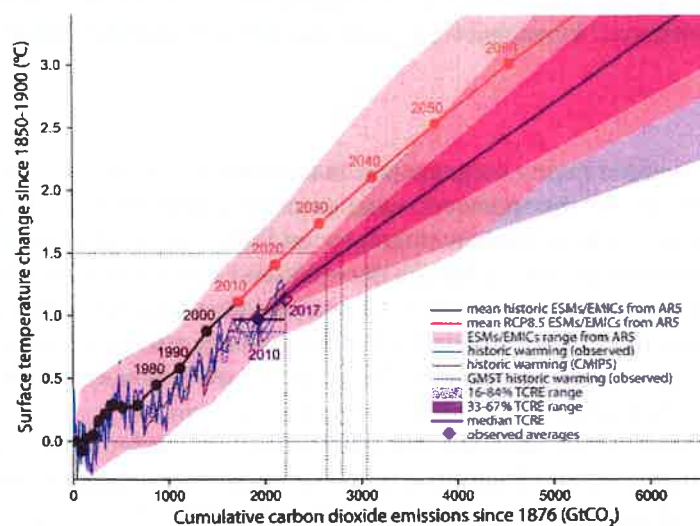


Abb. 6: Aus dem IPCC Report SR15 ([https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15\\_Chapter2\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf), Fig. 2.3): Temperaturänderung (seit 1850–1900) als Funktion der kumulativen globalen CO<sub>2</sub> Emissionen seit 1. Januar 1876.

Im fünften Sachstandsbericht des IPCC (AR5, 2013) wurde klar, dass die kumulativen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen weitgehend und nahezu linear die mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche bis zum späten 21. Jahrhundert und darüber hinaus bestimmen. Aus dem aktualisierten Diagramm im IPCC Report SR15 (Global Warming of 1.5°C; Abb. 6) lässt sich nun extrapolieren, wie viel CO<sub>2</sub> die Menschheit noch emittieren darf, bis die globale Temperatur 1,5°C bzw. 2,0°C erreicht. Für die untere Grenze (1,5°C) ergibt sich (ab 1. Januar 2019) ein verbleibendes Budget von 540 GtCO<sub>2</sub>, und für die obere Grenze (2,0°C) 1280 GtCO<sub>2</sub>. Berücksichtigt man, dass die Menschheit zurzeit jedes Jahr etwa 37 GtCO<sub>2</sub> emittiert, dann bleiben

uns noch 15 bzw. 35 Jahre, bis wir auf der ganzen Erde einen CO<sub>2</sub>-Emissionsstopp erreichen müssen.

### **Herausforderungen – Anpassung und Vermeidung**

Unsere Herausforderungen bestehen also darin, uns an den fortschreitenden Klimawandel anzupassen und diesen Klimawandel durch Vermeidungsmaßnahmen möglichst weit einzuschränken.

Anpassungsmaßnahmen betreffen den Meeresspiegelanstieg (Deiche erhöhen), Schutz vor Überschwemmungen und Katastrophenschutz bezüglich Extremwetter, insbesondere bei Starkniederschlägen, Hitzewellen und Dürren.

Vermeidungsmaßnahmen betreffen Energieeinsparungen, alternative Energie- und Heizungstechnologien, neue CO<sub>2</sub>-emissionsfreie Verkehrssysteme und Verkehrsmittel und neue Baumaterialien.

Die Wissenschaft hat die Probleme erkannt und Lösungswege ermittelt. Die Problemlösung erfordert eine politische, eine sozioökonomische und eine persönliche Umsetzung. Aber in allen drei Bereichen hapert es.

### **Literatur:**

Lüthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer, K. Kawamura, and T.F. Stocker., 2008: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, Vol. 453, pp. 379-382, doi:10.1038/nature06949

*IPCC Fifth Assessment Report (AR5): <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>*

*IPCC Special Report Global Warming of 1.5°C (SR 15): <https://www.ipcc.ch/sr15/>*

*IPCC Special Report Climate Change and Land (SRCCL): <https://www.ipcc.ch/report/srccl/>*

*IPCC Special Report Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: <https://www.ipcc.ch/report/srocc/>*

