

Die Erwärmung der Erde durch den Menschen ist eindeutig

Peter Lemke

*Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven
Helmholtz-Forschungsverbund „Regionale Klimaänderungen und Mensch“ (REKLIM)
Institut für Umwelphysik, Universität Bremen
(Stand: Januar 2022)*

Der heutige Zustand des Erdklimas ist das Ergebnis einer lang andauernden, kontinuierlichen Entwicklung: es ist ein Schnappschuss aus einem rund 4,5 Milliarden Jahre andauernden Film der Erdgeschichte, 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 ergeben sich ausgeprägte Änderungen als charakteristische Eigenschaft des Klimas, die sich auf Zeitskalen von Monaten bis zu Jahrmillionen erstrecken. Kurzfristige Schwankungen 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, Lithosphäre) 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 °C auf angenehme $+15\text{ °C}$ erhöht. Änderungen dieser Gasbestandteile der Luft werden daher Klimaänderungen hervorrufen.

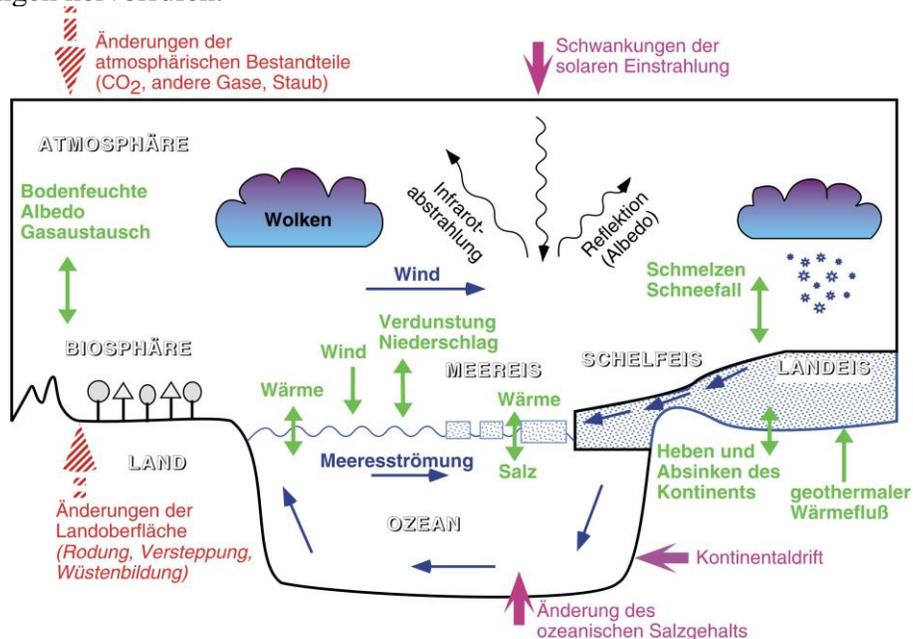


Abb. 1: Schematische Darstellung des Klimasystems. Die dünnen schwarzen bzw. blauen Pfeile stellen Strahlungs- bzw. Bewegungsvorgänge dar. Die grünen Pfeile deuten Wechselwirkungen im Klimasystem an. Die fetten Pfeile geben Veränderungen der äußeren Randbedingungen wieder, wobei die Auswirkungen menschlicher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

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. Der erste Band des Sechsten Sachstandsberichts (Die naturwissenschaftlichen Grundlagen) wurde im August 2021 veröffentlicht (siehe <http://www.ipcc.ch>). Band zwei und drei erscheinen im Februar/März 2022 und der abschließende Synthesebericht im September 2022. In den Jahren 2018 und 2019 wurden vom IPCC folgende Berichte herausgegeben: Sonderbericht 1.5 °C Globale Erwärmung (SR15), Sonderbericht Klimawandel und Landsysteme (SRCCL) und Sonderbericht Ozean und Kryosphäre (SROCC).

1. Welches sind die Ursachen der gegenwärtigen Klimaänderungen?

Der Kohlendioxid-Gehalt der Luft hat seit 1750 um 49 % von 280 ppm auf 416 ppm im Jahr 2021 zugenommen (ppm = parts per million = Volumenanteile pro Million; 416 ppm = 0,4 ‰). Die Zuwachsrate der letzten 10 Jahre ist die größte seit 50 Jahren. Der heutige CO₂-Wert ist bei weitem der größte in den letzten 800.000 Jahren, wie Messungen von Lufteinschlüssen in Eiskernen aus dem Antarktischen Eisschild zeigen (Abb. 2). In den Kaltzeiten betrug der CO₂-Gehalt der Luft etwa 180 ppm und in den Warmzeiten 280 ppm. Im Jahr 2021 betrug dieser Wert 416 ppm. Das stellt die Ursache unseres Klimaproblems dar. Durch Nutzung fossiler Energieträger hat die Menschheit den CO₂-Gehalt der Luft in den vergangenen 60 Jahren um mehr als 100 ppm erhöht, was dem Übergang von einer Kaltzeit zur Warmzeit entspricht, der jedoch im natürlichen Klimazyklus ca. 20.000 Jahre dauerte. Weitere Untersuchungen zeigen, dass die gegenwärtige CO₂-Konzentration so hoch ist wie seit zwei Millionen Jahren nicht mehr.

Obwohl der Gehalt an CO₂ in der Luft klein ist, so spielt er doch die wichtigste Rolle für den Treibhauseffekt, denn Stickstoff, Sauerstoff und Argon, die 99 % der Luftbestandteile ausmachen, sind keine Treibhausgase. Treibhausgase in der Atmosphäre absorbieren die Wärmestrahlung von der Erdoberfläche, senden sie zum Teil wieder zurück und erwärmen dadurch die Erdoberfläche zusätzlich.

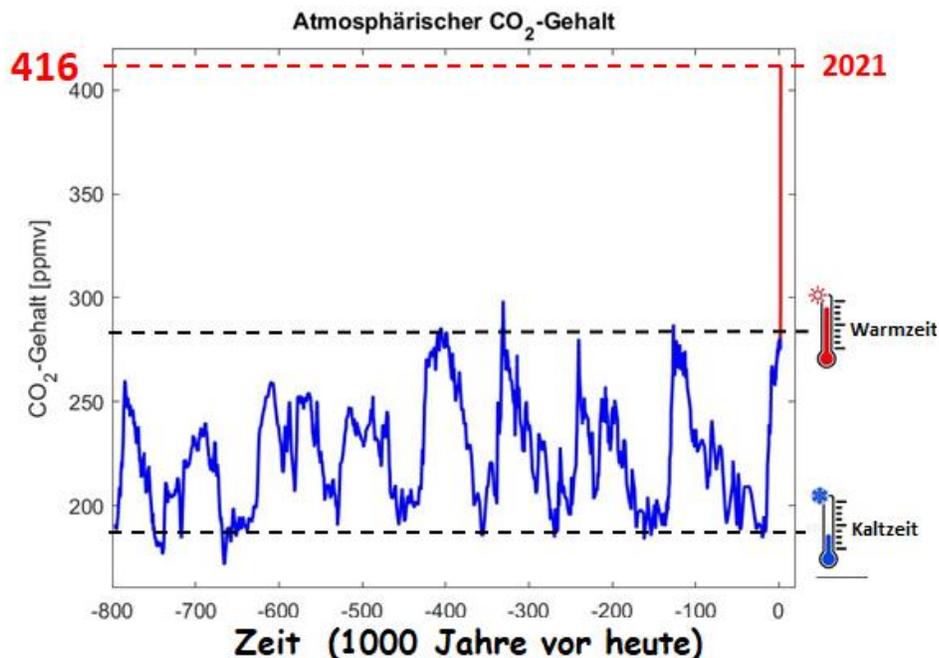


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung des CO₂-Gehalts der Luft seit 800.000 Jahren, ermittelt aus Lufteinschlüssen im EPICA Dome C (Antarktis) Eiskern (blau, Lüthi, D. et al., 2008) und direkten Messungen von Luftproben (seit 1958, rot, Datenquelle: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/).

Dabei gehen 89 % der CO₂-Erhöhung auf die Nutzung fossiler Brennstoffe zurück und 11 % auf Landnutzungsänderungen (z. B. Rodungen) (Abb. 3). An diese hohe Emissionsrate kann sich das Erdsystem (im Wesentlichen Biosphäre und Ozean) nicht anpassen, deswegen verbleiben 48 % der Emissionen in der Atmosphäre und erhöhen damit den natürlichen Treibhauseffekt beträchtlich. Es wird wärmer und wir steuern vermutlich auf eine Superwarmzeit zu. Die Biosphäre nimmt 29 % der Emissionen auf (Düngungseffekt durch den höheren CO₂ Gehalt) und 26 % gehen in den Ozean, der dadurch eine Versauerung erfährt, mit starken Konsequenzen für das marine Ökosystem.



Abb. 3: Quellen (sources) und Senken (sinks) des anthropogen emittierten CO₂ im Erdsystem (Ozean, Biosphäre, Atmosphäre) in Gt CO₂ pro Jahr (1 Gigatonne = 1 Milliarde Tonnen = 10¹² kg). (Graphik: Friedlingstein et al., 2021)

Andere wichtige Treibhausgase wie z. B. Methan, und Lachgas, deren Konzentrationen seit 1750 auch stark zugenommen haben, machen in der Klimawirkung zusammen etwas mehr als halb so viel aus wie der CO₂-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 Änderungen des Kohlendioxidgehalts 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 kondensiert der Wasserdampf und es regnet. 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 und einen höheren Wasserdampfgehalt zulässt.

Änderungen der solaren Einstrahlung haben zurzeit nur einen minimalen Einfluss auf die Temperatur der Erde. Dieser wird vom IPCC AR6 (2021, Tab. 7.8) mit ca. 0,5 % angegeben.

2. Welche Folgen des erhöhten Treibhauseffekts beobachten wir im Klimasystem?

Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig. Die globale Oberflächentemperatur ist seit 1880 um etwa 1,1 °C gestiegen. Der Trend der letzten 60 Jahre (0,15 °C/Dekade) ist doppelt so groß

wie der Trend der letzten 140 Jahre ($0,07\text{ °C/Dekade}$), und die vergangenen acht Jahre waren die wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen (Abb. 4). Inzwischen stellen die Jahre 2011 bis 2020 die wärmste Dekade und 2016 bzw. 2020 das wärmste Jahr seit Beginn der Messungen dar. Die Arktis hat sich doppelt so stark erwärmt wie die Erde im globalen Mittel.

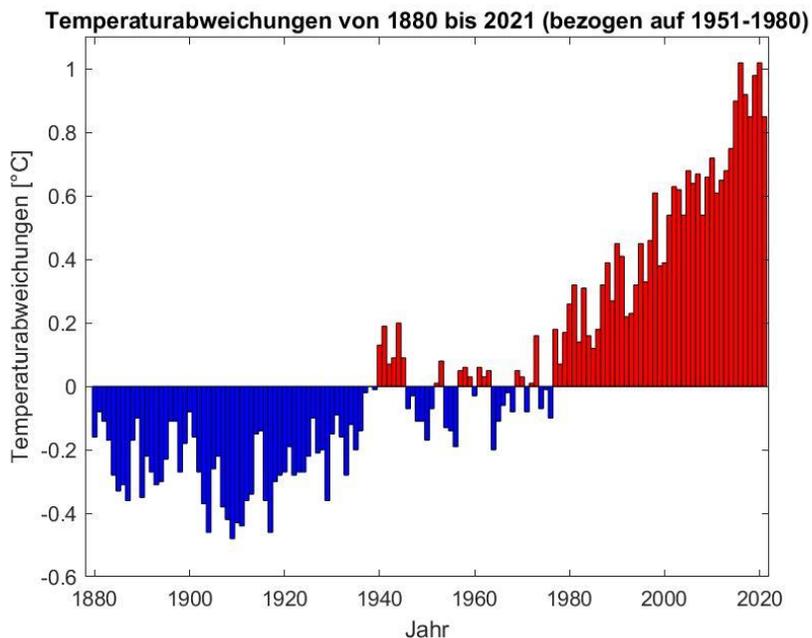


Abb. 4: Global gemittelte Anomalien der Lufttemperatur an der Erdoberfläche. (Abweichungen vom Mittelwert der Jahre 1951-1980; Datenquelle: GISS, <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>).

Auch Deutschland hat sich stärker erwärmt: der Trend seit 1880 beträgt $1,6\text{ °C}$ (Abb.5). Die Häufigkeit heftiger Niederschläge hat zugenommen.

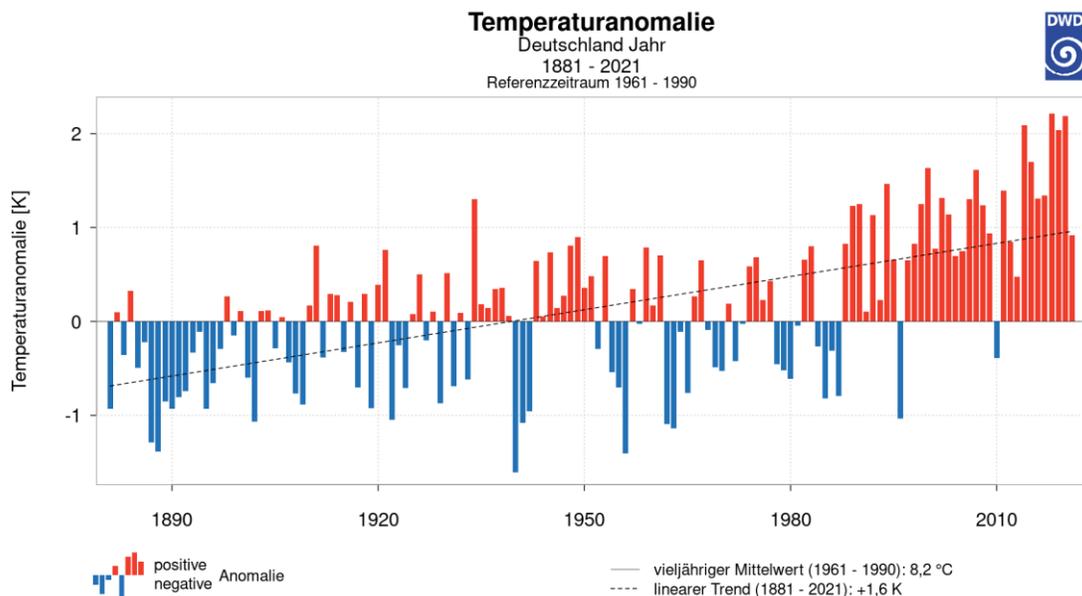


Abb. 5: Entwicklung der Temperaturanomalien in Deutschland von 1881 – 2021 (Graphik: Deutscher Wetterdienst).

Rekonstruierte Daten aus Beobachtungen und anderen Quellen, wie z. B. Baumringdaten, deuten darauf hin, dass die Temperaturen der letzten 50 Jahre sehr wahrscheinlich stärker angestiegen sind als in den vergangenen 2.000 Jahren.

Die schneebedeckte Fläche auf der Nordhemisphäre hat abgenommen, am deutlichsten im März und April. Weltweit schrumpfen die Gletscher und ihr Schmelzwasser trägt gegenwärtig mit 0.6 mm pro Jahr zum Meeresspiegelanstieg bei. Das Meereis verzeichnet in der Arktis seit 1979 einen Rückgang im Winter (März) um 10 % und im Sommer (September) um 44 % (Abb. 6). Diesem Trend sind deutliche natürliche Schwankungen überlagert. Grund für den starken Rückgang im Sommer ist die immer dünner werdende Meereisdecke. In der Antarktis ist kein signifikanter Rückgang des Meereises zu erkennen.

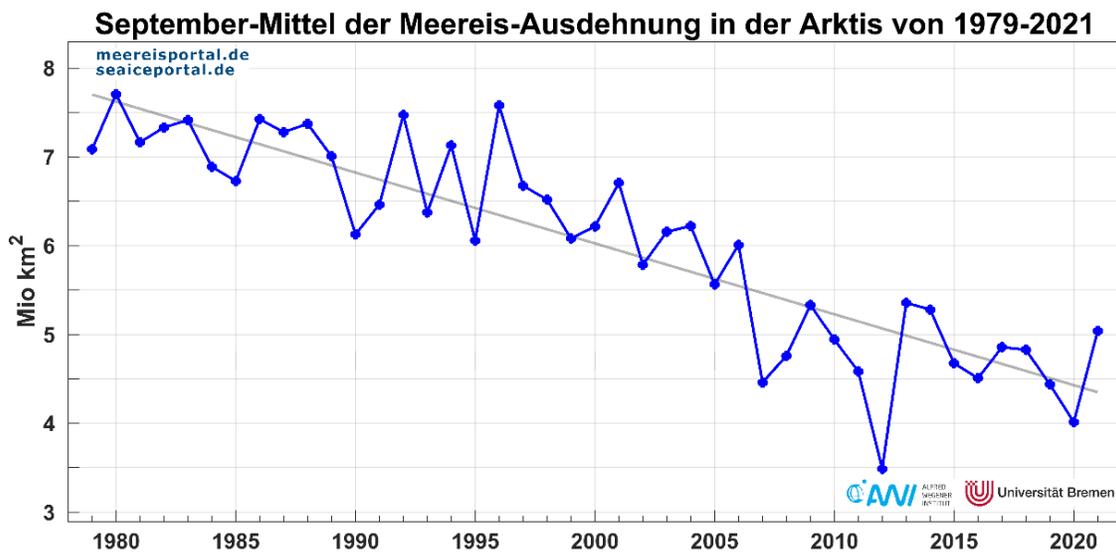


Abb. 6: Rückgang der sommerlichen Meereisausdehnung in der Arktis (Graphik: meereisportal.de).

Die Temperaturen in den oberen Schichten des Permafrostbodens auf der Nordhemisphäre haben sich seit 1980 um 1 bis 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 in Tiefen von 3000 m. Diese Erwärmung hat zum Anstieg des Meeresspiegels beigetragen. Der Meeresspiegel ist im 20. Jahrhundert global um 17 cm angestiegen. Dies ist der höchste Anstieg in den vergangenen 3.000 Jahren. Von 2006 bis 2018 betrug der Meeresspiegelanstieg durchschnittlich etwa 3,7 mm pro Jahr (Abb. 7). Davon ist etwas mehr als die Hälfte verursacht durch das Schmelzwasser schrumpfender Eismassen auf den Kontinenten (Gletscher 0,6 mm/Jahr; Grönländischer Eisschild: 0,9 mm/Jahr, Antarktischer Eisschild 0,5 mm/Jahr).

Also liegt der Schmelzwasseranteil insgesamt bei 2,0 mm/Jahr. Die Differenz zum beobachteten Anstieg von 3,7 mm/Jahr geht auf die Ausdehnung des Meerwassers durch die Erwärmung (1,4 mm/Jahr) und auf Änderungen im Wasserhaushalt der Kontinente zurück (Grundwasser, Talsperren, etc.) (IPCC, AR6, 2021).

Ein Trend in der Stärke der meridionalen Umwälzbewegung im Atlantik (oft vereinfacht aber unzutreffend als "Golfstrom" bezeichnet) kann aus den vorliegenden Daten nicht abgeleitet werden.

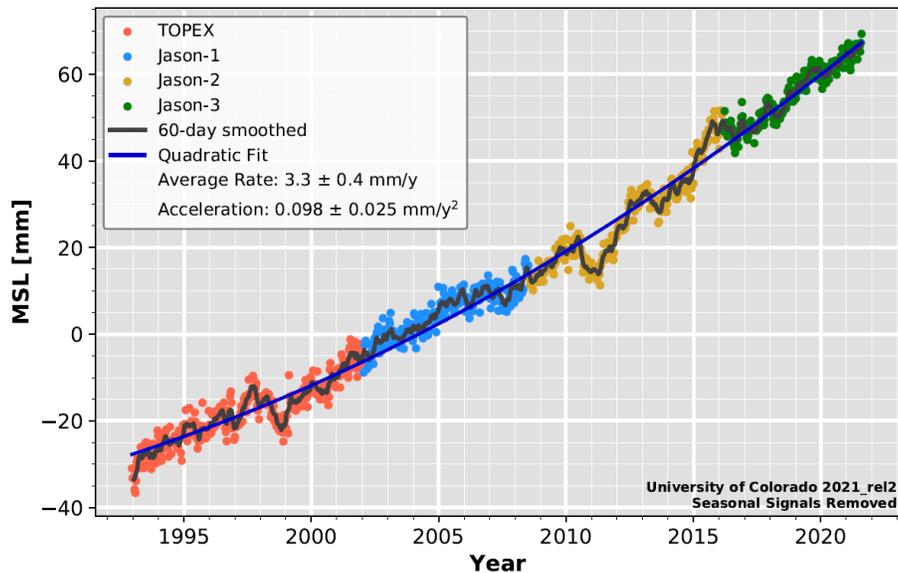


Abb. 7: Anstieg des Meeresspiegels im globalen Mittel (Graphik: <https://sealevel.colorado.edu/data/2021rel2>)

3. Wie könnte sich das Klima in der Zukunft entwickeln?

Klimamodelle wurden in den vergangenen vierzig Jahren im Rahmen des Weltklimaforschungsprogramms (World Climate Research Programme: <https://www.wcrp-climate.org/>) 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 kurzfristigen Abkühlung. Diese Modellrechnungen und ihr Vergleich mit Beobachtungen zeigen, dass die Erwärmung der letzten 50 Jahre mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit im Wesentlichen durch anthropogene Treibhausgasemissionen (hauptsächlich Kohlendioxid) verursacht worden ist.

Klimaprojektionen für die nächsten 100 Jahre lassen sich daher überzeugend durch Klimamodelle simulieren, die mit Energienutzungsszenarien angetrieben werden (Abb. 8). Für diese Szenarien (Shared Socio-economic Pathway (SSP) = Gemeinsam genutzte sozio-ökonomische Pfade) wurden fünf Beispiele für die mögliche Entwicklung der menschlichen Gesellschaft in der Zukunft skizziert. Sie reichen von einer sparsamen und nachhaltigen Gesellschaft, die zügig nur alternative Energiequellen nutzt, bis hin zu einem „Weitermachen wie bisher“. Diese Szenarien für mögliche Zukünfte wurden nach der Menge der immer noch von Menschen emittierten Treibhausgase sortiert (SSP1 = klein bis SSP5 = sehr groß). Die Zahl hinter der Szenarien Nummer gibt die entsprechende Erhöhung des zusätzlichen Strahlungsantriebs durch die Treibhausgase an (1,9 = klein bis 8,5 = sehr groß).

Klimamodelle sagen – je nach Energienutzung – eine weitere Temperaturerhöhung und einen deutlichen Meeresspiegelanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts voraus (IPCC AR6 SPM). Für die letzten beiden Dekaden des 21. Jahrhunderts ist der wahrscheinlichste Wert der globalen Erwärmung für das niedrigste Szenario 1,4 °C und für das höchste Szenario 4,4 °C, bezogen auf den Zeitraum 1850-1900 (siehe Table SPM B.1.2). Die größte Erwärmung findet dabei in hohen nördlichen Breiten statt. Für den Meeresspiegelanstieg ergeben sich dementsprechend 0,4 m für das niedrigste und 0,8 m für das höchste Szenario (bezogen auf 1850-1900; AR6, Table 9.10).

(a) Global surface temperature change relative to 1850–1900

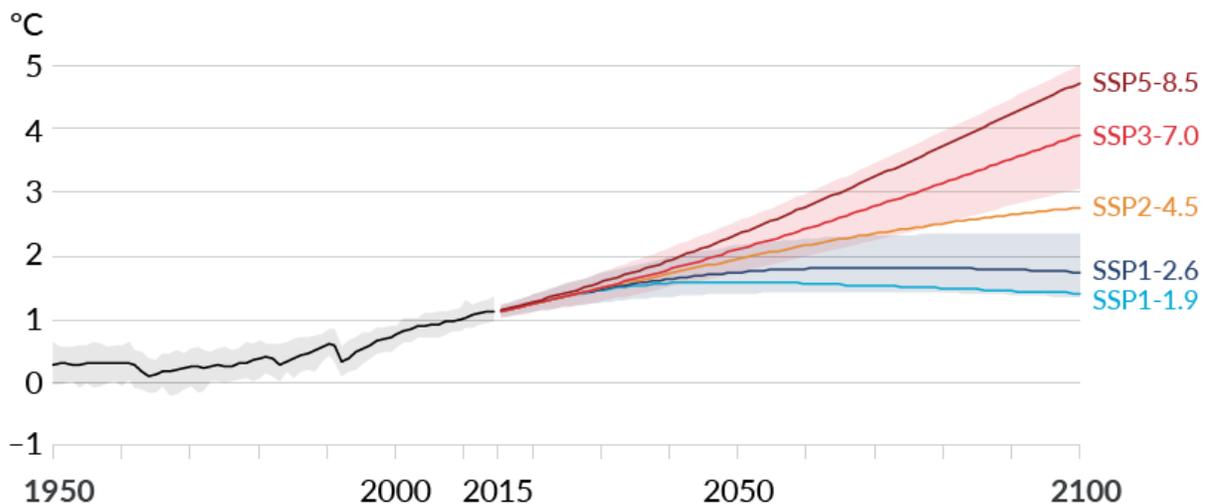


Abb. 8: Anstieg der globalen Oberflächentemperatur bis zum Ende dieses Jahrhunderts für verschiedene Energieszenarien (IPCC AR6 (SPM), Fig. SPM.8) (Graphik: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>). Die Schattierungen geben die entsprechenden Unsicherheitsbereiche an.

Für die nächsten zwei bis drei 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. 0.3 °C erfolgen (IPCC AR6, Chapter 4).

Langfristige Projektionen zeigen, dass der Meeresspiegel auch nach vollständigem Ende der Emissionen über viele Jahrhunderte ansteigen wird, bedingt durch weitere langsame 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 von deutlich über 3 °C zu einem vollständigen Abschmelzen des grönländischen Inlandeises führen würde, entsprechend einem Meeresspiegelanstieg um 7 m. Dieses Abschmelzen würde sich allerdings über viele Jahrhunderte hinziehen.

Es ist wahrscheinlich, dass die Meridionale Umwälzbewegung im Atlantik je nach Energieszenario um 15 - 30 % im Laufe des 21. Jahrhunderts abnehmen wird. Die Temperaturen in der nordatlantischen Region werden dennoch zunehmen, da der Einfluss der globalen Erwärmung überwiegt. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass es zu einem abrupten Zusammenbruch der Meridionalen Umwälzbewegung im Atlantik im 21. Jahrhundert kommt.

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

Klimaänderungen werden sich in Zukunft deutlich bemerkbar machen. Es ist offensichtlich, dass die Menschheit ein gigantisches Experiment mit der Erde begonnen hat, 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.

Im fünften Sachstandsbericht des IPCC (AR5, 2013) wurde klar, dass die Gesamtmenge an globalen CO₂-Emissionen seit Beginn der Industrialisierung weitgehend und nahezu linear die mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche bis zum späten 21. Jahrhundert und darüber hinaus bestimmt. Aus dem aktualisierten Diagramm im IPCC Report AR6 (Abb. 9) lässt sich nun extrapolieren, wie viel CO₂ 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 2020) ein verbleibendes Budget von 500 Gt CO₂, und für die obere Grenze (2,0 °C) 1350 Gt CO₂ (AR6, Table SPM2). Berücksichtigt man, dass die Menschheit zurzeit jedes Jahr etwa 37 Gt CO₂ emittiert, dann bleiben uns nur noch 14 bzw. 36 Jahre, bis wir auf der ganzen Erde einen CO₂-Emissionsstopp erreichen müssen (Netto-Null), wenn wir so weitermachen wie bisher. Wir können diese Zeit strecken, wenn wir schon jetzt anfangen unsere CO₂-Emissionen deutlich zu senken.

Global surface temperature increase since 1850-1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)

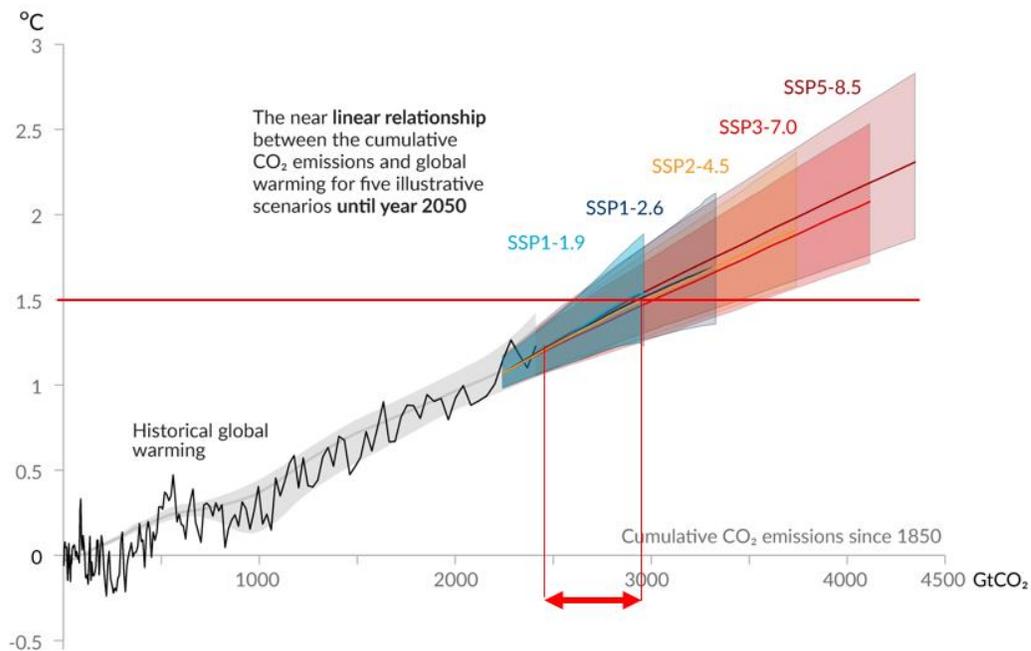


Abb. 9: Temperaturänderung (seit 1850–1900) als nahezu lineare Funktion der gesamten globalen CO₂-Emissionen seit 1850 (IPCC AR6 (SPM), Fig. SPM.10) (Graphik: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>). Die schwarze Linie zeigt die historischen Daten und die unterschiedliche Farbe gibt die zusätzliche Menge an CO₂-Emissionen und die daraus resultierenden Temperaturerhöhungen für die jeweiligen Szenarien für die nächsten 30 Jahre an. Die Schattierungen stellen die entsprechenden Unsicherheitsbereiche dar.

4. Welche Herausforderungen kommen auf uns zu? → Anpassung und Vermeidung

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

Die durch den Menschen emittierten Treibhausgase (insbesondere CO₂) werden auch nach einem Stopp der Emissionen noch für Jahrzehnte bis Jahrhunderte in der Atmosphäre verbleiben und das Klima bestimmen. Die Oberflächentemperatur wird daher noch lange auf einem hohen Niveau bleiben, das durch die Gesamtmenge an emittiertem CO₂ bestimmt wird. Die gegenwärtigen nationalen Absichtserklärungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen deuten auf eine

Temperaturerhöhung von etwa 3 °C hin. Die Beschlüsse von Paris in 2015 werden so nicht eingehalten werden können.

Eine Häufung der Wetterextreme ist die Folge, auch in Deutschland. Beispiele sind die Überschwemmungen in Westdeutschland (insbesondere im Ahrtal) in 2021 mit immensen Schäden an der Infrastruktur vieler Dörfer und Städte und die Dürre in Nord- und Ostdeutschland in 2018 mit großen Verlusten in der Landwirtschaft. Zunehmend werden Anpassungsmaßnahmen zum Schutz vor den Folgen von Extremwetterlagen nötig, insbesondere bei Starkniederschlägen, Überschwemmungen, Hitzewellen und Dürren.

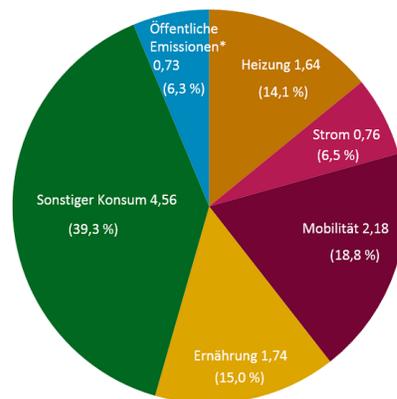
Neben diesen Extremereignissen wird der Meeresspiegelanstieg der Menschheit am meisten zu schaffen machen, weil zurzeit weltweit mehr als 200 Millionen Menschen unterhalb von 5 m (über Normalnull) leben. Diese Zahl wird sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wohl verdoppeln. In vielen Ländern sind schon heute die Küsten durch Hochwasser bedroht. Da die tieferen Schichten des Ozeans nur sehr langsam von der Oberfläche her erwärmt werden, dehnt sich das Volumen der Meere nur sehr langsam aus. Der Meeresspiegel steigt entsprechend an und wird es auch nach einem Ende der CO₂-Emissionen noch für Jahrhunderte tun. Zusätzlich wird der Ozean das Schmelzwasser der Gletscher und Eisschilde aufnehmen. In der näheren Zukunft wird man die Deiche erhöhen müssen, aber nicht alle Küstenländer können sich das leisten. Auf lange Sicht werden sich auch Menschen der reichen Länder in höhere Landstriche zurückziehen müssen. Anpassungsmaßnahmen werden umso schwieriger je stärker der Klimawandel voranschreitet.

Vermeidungsmaßnahmen sind daher unbedingt notwendig. Sie betreffen Investitionen in alternative Energie- und Heizungstechnologien, neue CO₂-emissionsfreie Verkehrssysteme und Verkehrsmittel und neue Baumaterialien. Hier sind Bund, Länder und Kommunen aufgefordert, Investitionsanreize für Unternehmen und Privatpersonen zu schaffen.

Auch im privaten Bereich lässt sich einiges bewegen. Der Treibhausgasausstoß pro Kopf von ca. 11,6 t/Jahr in 2017 in Deutschland (Abb. 10) macht deutlich, wo jeder seine CO₂-Emissionen reduzieren kann. Energieeinsparungen bei Strom und Heizung und ein sorgsamer Umgang mit unseren Nahrungsmitteln, von denen in westlichen Ländern etwa ein Drittel weggeworfen wird und im Müll landet, würden unseren CO₂-Fußabdruck deutlich verringern. Noch mehr lässt sich bei der Mobilität (weniger Autos mit Verbrennungsmotor fahren) und durch Einschränkung des Konsums (vom T-Shirt bis zum Smartphone), der knapp 40 % unserer CO₂-Emissionen ausmacht, einsparen.

Treibhausgasausstoß pro Kopf in Deutschland nach Konsumbereichen (2017)

(in t CO₂e)



* Emissionen aus Verwaltung, Organisation des Sozialwesens, Infrastruktur, Bildung, Wasserversorgung und Abfallentsorgung

Quelle: UBA-CO₂-Rechner (http://www.uba.co2-rechner.de/de_DE)

Abb. 10: Treibhausgas-Emissionen pro Person in Deutschland. (Graphik: Umweltbundesamt, UBA)

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 sind noch große Herausforderungen zu bewältigen.

Literatur:

Friedlingstein et al., (2021): Global Carbon Project (2021) Carbon budget and trends 2021. www.globalcarbonproject.org/carbonbudget

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, 2013): <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>

IPCC Special Report Global Warming of 1.5 °C (SR 15, 2018): <https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC Special Report Climate Change and Land (SRCCL,2019): <https://www.ipcc.ch/report/srccl/>

IPCC Special Report Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC, 2019): <https://www.ipcc.ch/report/srocc/>

IPCC Sixth Assessment Report (AR6, 2021): <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

World Climate Research Programme (WCRP: Weltklimaforschungsprogramm): <https://www.wcrp-climate.org/>

World Ocean Review: <https://worldoceanreview.com/de/wor-1/kuesten/lebensraum-kueste/>