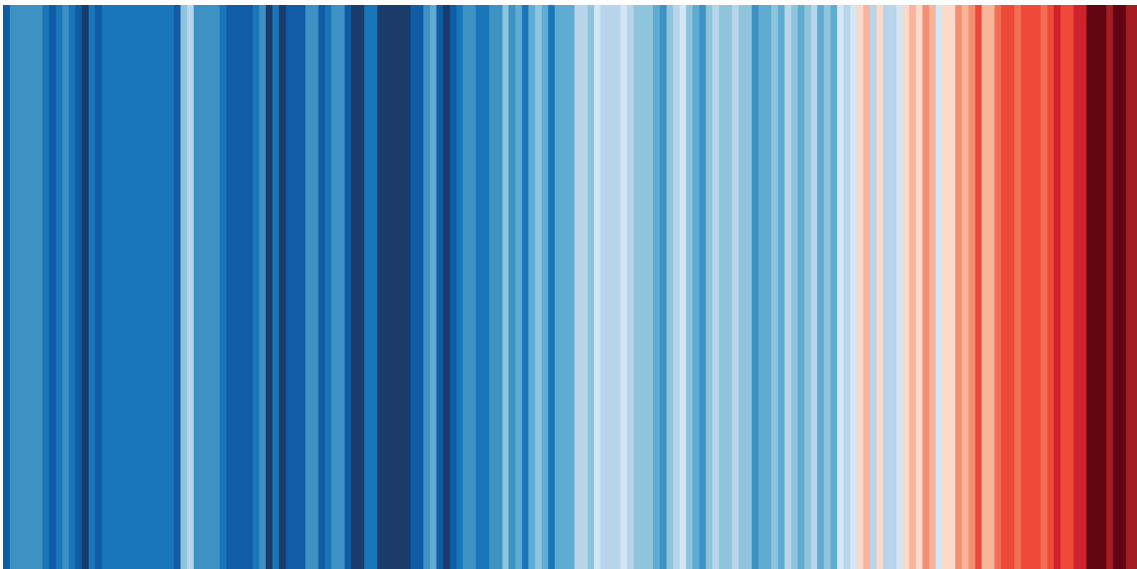


Was wir heute übers Klima wissen

Basisfakten zum Klimawandel, die in der
Wissenschaft unumstritten sind

Stand: Dezember 2023



herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst,
Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de



Die fünf Kerninfos zum Klimawandel in nur 20 Worten¹:

1. Er ist real.
2. Wir sind die Ursache.
3. Er ist gefährlich.
4. Die Fachleute sind sich einig.
5. Wir können noch etwas tun.

Inhalt

Grundlagen zum Klimawandel	4
1. Der natürliche Treibhauseffekt	4
2. Der Mensch verstärkt den Treibhauseffekt	4
3. Ursachen von Klimaänderungen – interne Schwankungen	6
4. Ursachen von Klimaänderungen – äußere Einflüsse	7
5. Klimamodelle	8
Globaler Klimawandel	9
6. Weltweite Erwärmung	9
7. Beispiellose Häufung von Rekorden	9
8. Das Arktische Meereis schwindet	10
9. Festland-Eis und Schneedecke schrumpfen	12
10. Die Meeresspiegel steigen – und zwar immer schneller	13
11. Ozeane versauern, Korallen sterben	14
12. Wetterextreme nehmen zu, regional sinken Ernteerträge	14
Klimawandel in Deutschland	15
13. Bereits knapp 2 °C Erwärmung – deutlich mehr als der weltweite Durchschnitt	15
14. Beispiellose Häufung von Wärme-Rekordjahren	16
15. Mehr Hitze, weniger Frost	16
16. Mehr Starkregen – und zugleich längere Trockenzeiten	17
17. Pflanzen und Tiere reagieren sensibel auf die Erwärmung	20
18. Land- und Forstwirtschaft leiden bereits unter dem Klimawandel	21
19. Die Waldbrandgefahr nimmt zu	21
20. Binnenseen in Deutschland sind deutlich wärmer geworden	21
21. Der Meeresspiegel steigt auch an den deutschen Küsten von Nord- und Ostsee	22
Künftige Entwicklung	23
22. Das 1,5 °C-Limit wird bei gegenwärtiger Politik verfehlt	23
23. Starke Emissionssenkungen sind möglich	24
24. Unumkehrbare Veränderungen	25
25. Jedes Zehntelgrad zählt	26

Grundlagen zum Klimawandel

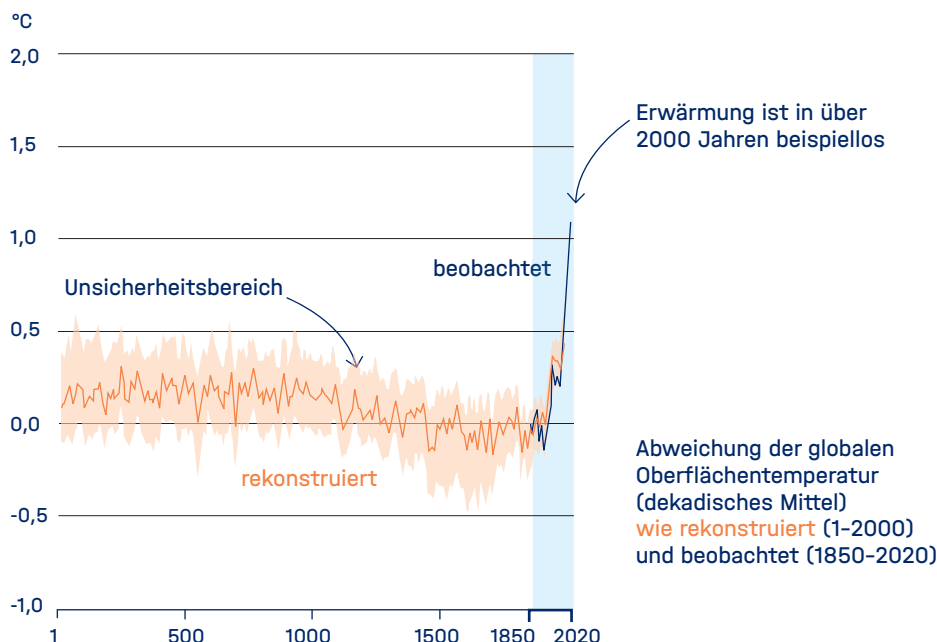
1. Der natürliche Treibhauseffekt

Einige Spurengase und Partikel in der Lufthülle der Erde sorgen dafür, dass ein Teil der Energie, die über die Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche ankommt und diese erwärmt, nicht unmittelbar von ihr in Form von Infrarotstrahlung ins Weltall abgestrahlt wird. Die Gase werden Treibhausgase genannt, ihre Wirkung Treibhauseffekt. Die wichtigsten Treibhausgase sind Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O), die sich unterschiedlich lang in der Atmosphäre aufhalten.²

Ohne Treibhausgase, aber bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen, wäre die Oberflächentemperatur der Erde im Mittel etwa minus 18 °C kalt. Durch den Treibhauseffekt steigt sie um circa 32 °C auf rund plus 14 °C und macht so die Erde erst für Menschen bewohnbar. Diese grundsätzlichen Zusammenhänge sind seit mehr als 150 Jahren bekannt. Sie sind in der Wissenschaft unumstritten und durch zahlreiche Experimente und Messungen belegt.³

2. Der Mensch verstärkt den Treibhauseffekt

Der Einfluss des Menschen hat die Atmosphäre nahe der Erdoberfläche in einem Maße erwärmt, wie es seit mindestens 2000 Jahren nicht mehr der Fall war - und das in den letzten 50 Jahren mit einer beispiellosen Geschwindigkeit.



Abweichungen von der durchschnittlichen globalen Oberflächentemperatur zwischen 1850 und 1900, rekonstruiert aus paläoklimatischen Archiven (durchgezogene orange Linie, Jahre 1-2000) und aus direkten Beobachtungen (durchgezogene dunkelblaue Linie von 1850 bis 2020).

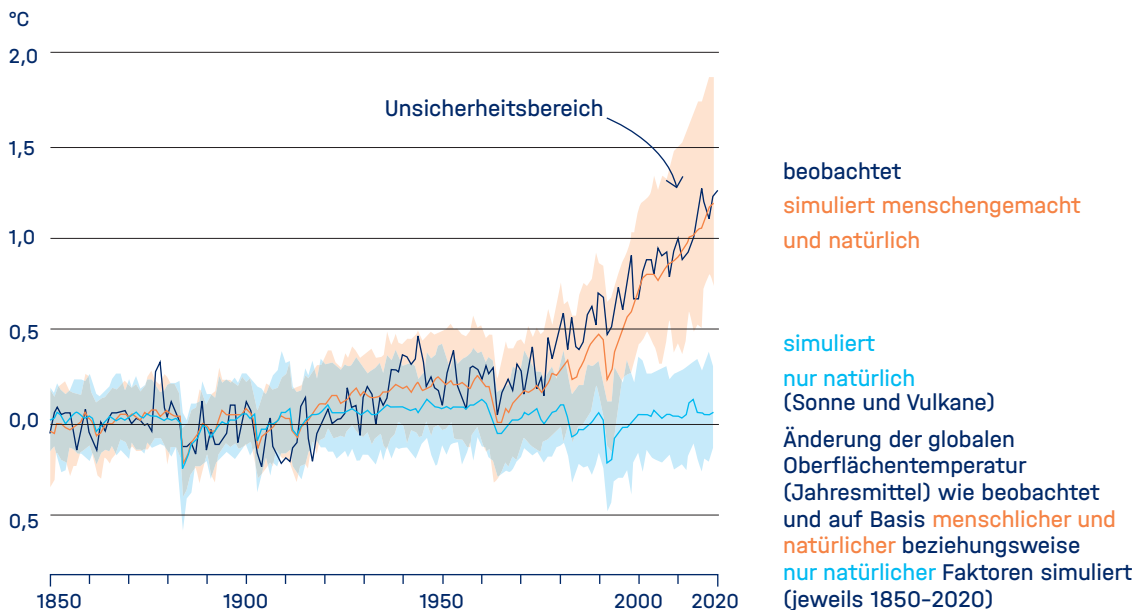
Quelle: IPCC, AR6, SPM.1, modifiziert

herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst,
Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de

Änderungen der globalen Oberflächentemperatur 1850–2020

Referenzzeitraum 1850–1900



Mit der Oberflächentemperatur ist die Temperatur nahe der Erdoberfläche gemeint; über Land ist dies die Lufttemperatur in ca. 2 Meter Höhe, über See die Wassertemperatur nahe der Oberfläche, die immer sehr nahe an der Temperatur der angrenzenden Luftschicht ist.

Quelle: IPCC, 2021–2022, AR6, SPM.1

Die Menschheit ist nachgewiesenermaßen Ursache der aktuellen Klimaänderung; sie ist nach aktuellem Stand der Wissenschaft hauptsächlich verursacht durch die menschengemachte Verstärkung des Treibhauseffekts. Seit Beginn der Industrialisierung am Ende des 18. Jahrhunderts, also seit mehr als 200 Jahren, nimmt die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre stark zu. Kohlendioxid entsteht durch die Verbrennung kohlenstoffhaltiger Energieträger, die im Laufe der Erdgeschichte entstanden sind („fossile Energieträger“) – vor allem Kohle, Erdöl und Erdgas. Die Hauptquellen von Methan sind in der intensiven Landwirtschaft (insbesondere die Nutztierhaltung) und in der Nutzung fossiler Energieträger (unter anderem durch Lecks an Erdgas-Bohrlöchern oder -Leitungen). Lachgas (N_2O) wird vor allem in der Landwirtschaft zusätzlich freigesetzt (beispielsweise durch den Einsatz großer Mengen Kunstdünger).⁴

Zugleich wurden und werden große Waldflächen abgeholzt oder abgebrannt, Moore trockengelegt, die Nutzungen von Böden verändert. Dadurch werden einerseits weitere Treibhausgase freigesetzt, andererseits gibt es dann weniger Wälder und Moore, die Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen und binden können.

Die Konzentration von Kohlendioxid in der Erdatmosphäre lag 2022 im Jahresmittel bei 419 ppm (das sind 419 CO_2 -Moleküle pro eine Million Luftmoleküle, gemessen an der Referenzstation Mauna Loa auf Hawaii und repräsentativ für die Nordhalbkugel).⁵ Dies bedeutet eine Zunahme um fast 50 Prozent gegenüber dem Niveau vor Beginn der Industrialisierung. Besonders steil war der Anstieg in den vergangenen drei Jahrzehnten.⁶ Die CO_2 -Konzentration liegt damit viel höher als jemals zuvor in den zurückliegenden 800.000 – wahrscheinlich sogar drei Millionen Jahren.⁷

Das Mischungsverhältnis von Methan erreichte als Jahresmittel (2022) 1.912 ppb (Teilchen pro Milliarde Luftmoleküle, globaler Durchschnitt) bereits rund das Zweieinhalbfache des vorindustriellen Niveaus erreicht.⁸

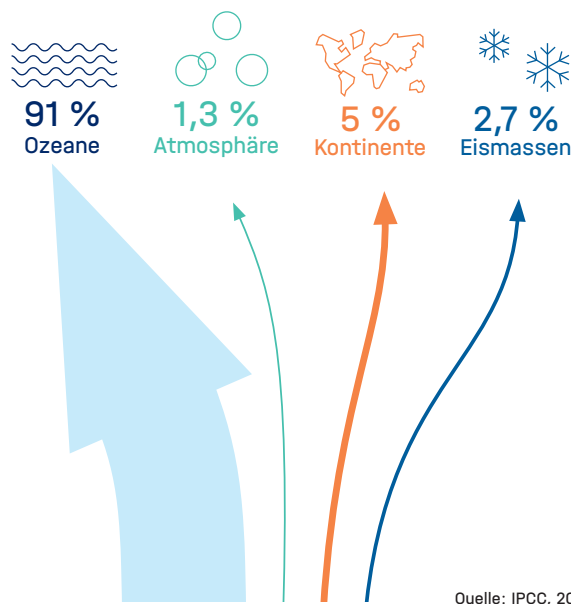
herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst,
Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de

Weil die Treibhauswirkung von Methan über einen Zeitraum von 100 Jahren pro Molekül etwa 25-mal so stark ist wie jene von Kohlendioxid, hat auch dieser Anstieg einen erheblichen Klimaeffekt. Die Konzentration von Lachgas in der Atmosphäre hat seit Beginn der Industrialisierung von 270 ppb auf 337 ppb zugenommen.⁹

3. Ursachen von Klimaänderungen – interne Schwankungen

Wohin fließt die zusätzliche Energie?



Das Klimasystem der Erde beruht auf einem komplexen Zusammenspiel von Atmosphäre, Biosphäre, Landmassen (Lithosphäre), Ozeanen und Eismassen (Kryosphäre). Diese tauschen ständig Energie und Masse untereinander aus. Dadurch schwanken typische Zirkulationsmuster in der Atmosphäre und den Ozeanen, wie die Hadleyzirkulation, die Westwindgürtel und die Subpolarwirbel auf Zeitskalen von Tagen bis zu Jahrhunderten in ihrer Intensität und ihrem Ausmaß.

Durch die Verstärkung des Treibhauseffekts durch die Menschen ist im gesamten Klimasystem der Erde zusätzliche Energie vorhanden. Nur gut ein Prozent dieser Überschuss-Energie verbleibt im Mittel in der Lufthülle der Erde, etwa 91 Prozent reichern sich in den Weltmeeren an.¹⁰ So kann die Temperatur der Atmosphäre durchaus stagnieren oder gar abnehmen (wie es immer mal wieder und auch über einige Jahre hinweg vorkommt), während gleichzeitig die Temperatur der Ozeane weiter ansteigt. Der Wärmeinhalt der Ozeane ist damit ein besserer Indikator für die Klimaerwärmung als die stärker und schneller schwankende Lufttemperatur.

Durch die internen Wechselwirkungen im Klimasystem entstehen im globalen Mittel in der Regel Schwankungen der bodennahen Lufttemperatur von nur wenigen Zehntelgrad. Diese kurzfristigen Schwankungen wie auch natürliche äußere Klimaeinflüsse (siehe Punkt 4) überlagern den langfristigen Erwärmungstrend infolge der Anreicherung von Treibhausgasen durch den Menschen. Die Kurve der globalen Mitteltemperatur ist deshalb eine ansteigende Zickzack-Linie.

4. Ursachen von Klimaänderungen – äußere Einflüsse

Das Klima hat sich über die Jahrmillionen der Erdgeschichte vielfach verändert. Die wesentlichen Ursachen dafür sind wissenschaftlich geklärt. Erdgeschichtliche Warm- und Kaltzeiten wurden vor allem hervorgerufen durch die Änderungen der Erdbahn um die Sonne oder der Rotationsachse der Erde, Erdbahnparameter genannt, und durch die Verschiebung von Kontinenten. Die dadurch verursachten Veränderungen der globalen Temperatur laufen allerdings im Vergleich zur aktuellen Erwärmung extrem langsam ab – der kürzeste der Erdbahnparameterzyklen beispielsweise hat eine Dauer von 23.000 Jahren.

Erkenntnisse über das Klima der Vergangenheit (dieser Forschungszweig heißt „Paläoklimatologie“) werden durch Auswertung natürlicher Klimaarchive wie Sedimentablagerungen am Grund von Ozeanen und Seen gewonnen. Bohrungen auf Grönland und in der Antarktis fördern Eis zutage, das Luftbläschen aus der Atmosphäre enthält, die bis zu 800.000 Jahre alt sind. Daraus können die Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre und die Temperaturen bis weit in die Vergangenheit rekonstruiert werden. Dabei stellt sich unter anderem heraus, dass sich die historischen Klimaschwankungen nur erklären lassen, wenn man auch die Änderungen des Treibhauseffekts mit einbezieht. Über die jüngere Vergangenheit geben Baumringe oder Korallen Auskunft.¹¹

Die vielfältigen Forschungen haben natürliche Ursachen für den aktuellen, sehr steilen Temperaturanstieg seit Beginn der Industrialisierung ausgeschlossen. Er ist nach aktuellem Stand der Wissenschaft nur durch die menschengemachte Verstärkung des Treibhauseffekts erklärbar.¹²

Die Sonne beispielsweise kann nicht die Ursache der globalen Erwärmung sein, denn seit etwa 50 Jahren nimmt ihre Leuchtkraft leicht ab – während in diesem Zeitraum der stärkste Temperaturanstieg gemessen wurde.¹³ Selbst ein künftiges absolutes Aktivitätsminimum der Sonne wie während der Kleinen Eiszeit zwischen dem 15. und dem 19. Jahrhundert würde wenig am Klimawandel ändern: In einem solchen (hypothetischen) Fall würde sich die Erdmitteltemperatur nur um wenige Hundertstel- oder Zehntelgrad verringern, während der Anstieg gegenüber der vorindustriellen Zeit jetzt bereits etwa 1,1 °C beträgt.¹⁴

Ein weiterer natürlicher Klimafaktor sind Vulkanausbrüche. Dabei gelangen insbesondere Schwefelgase in die Atmosphäre, aus denen dort Schwefelteilchen entstehen – sogenannte Aerosole. Diese reflektieren einen Teil des Sonnenlichts, was zu einer gewissen Abkühlung der Erde führt. Dieser Effekt hält aber nur wenige Jahre an. Der bisher letzte klimawirksame Vulkanausbruch dieser Art war der Ausbruch des Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991. Über längere Zeiträume hat Vulkanaktivität keinen signifikanten Einfluss auf die aktuelle globale Erwärmung.¹⁵ Allerdings lässt sich nicht vorhersagen, wann in Zukunft mit welchen Vulkanausbrüchen und in welcher Häufigkeit gerechnet werden muss. Es ist aber wahrscheinlich, dass im Laufe dieses Jahrhunderts mindestens einmal eine kurzfristige Abkühlung wie nach dem Ausbruch des Pinatubo 1991 zu erwarten ist. Im Januar 2022 fand der Ausbruch des Vulkans Hunga Tonga-Hunga Ha’apai statt. Dabei handelt es sich um einen Unterwasservulkan im Südpazifik, dessen Eruption zu einem Eintrag von Wasserdampf in die Stratosphäre führte, der dort als Treibhausgas wirksam ist. Die genauen Auswirkungen werden derzeit analysiert.¹⁶

5. Klimamodelle

Wir haben keine zweite Erde. Deshalb kann es keine Experimente geben, die uns zeigen, was auf der Welt passieren würde, wenn die Emissionen immer weiter steigen. Stattdessen nutzt die Wissenschaft Klimamodelle. Das sind Computerprogramme, die das Klimasystem der Erde simulieren – auf der Basis der physikalischen Grundgesetze, wie dem Erhalt von Masse, Impuls und Energie. Meist werden mehrere Klimamodelle mit unterschiedlicher Komplexität und Detaillierung der Wechselwirkungen in und zwischen den Klimaelementen herangezogen und dann mit den einzelnen Modellen sehr viele Rechendurchläufe durchgeführt. Aus der Summe der Ergebnisse werden Mittelwerte abgeleitet sowie Spannbreiten verschiedener Klimavariablen berechnet. Man nennt das auch „Ensemble-Betrachtungen“.

Die Klimaforschung verwendet bereits seit über 30 Jahren diese Modelle und kann daher inzwischen auch im Rückblick beurteilen, ob sie grundsätzlich zutreffen. Denn man kann vergleichen: Was haben diese Modelle damals über die Zukunft ausgesagt, also die Zeit, die wir jetzt bereits erleben? Das Ergebnis: Der weltweite Temperaturanstieg bewegt sich heute in dem Schwankungsbereich, den der Weltklimarat (IPCC) schon 1990 in seinem ersten Sachstandsbericht erwartet hat. Der Vergleich zeigt, dass die Klimamodelle sehr verlässlich sind, vor allem, wenn es um die globale Erwärmung geht.

Komplexer und daher schwieriger zu berechnen sind die Folgen einer immer wärmeren Welt insbesondere für das Wasser im Erdsystem, und hier insbesondere die Entwicklung der Niederschläge. Wo wird es trockener? Wo wird es nasser? Und wie sehr? Hierzu braucht man globale Klimamodelle, die mit einer einhundertmal höheren Auflösung gerechnet werden können als bisher, flankiert durch entsprechend höher aufgelöster Beobachtungen. Durch die neueste Generation von Hochleistungsrechnern und neue flächenhafte fernerkundliche Beobachtungen wird dies zunehmend möglich. Das Bundesforschungsministerium fördert hierzu die gemeinsame Strategie der Erdsystemmodellierung in Deutschland.

Um mithilfe der Klimamodelle noch mehr über die Zukunft zu erfahren, nutzen Forschende unterschiedliche Klimaszenarien, zum Beispiel für Treibhausgasemissionen, aber auch Änderungen der Landnutzung, weil sich nicht vorhersagen lässt, wie sich die Menschen in Zukunft verhalten. Wird die Politik Rahmenbedingungen schaffen, welche die Emissionen schnell senken? Werden technologische Innovationen den Klimaschutz vorantreiben? Szenarien zeigen also keine realen Entwicklungen, sondern ‚mögliche Zukünfte‘. Sie funktionieren nach dem Wenn-Dann-Prinzip: Wenn eine bestimmte Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre ist, dann passiert dies oder jenes. Deshalb spricht man in der Wissenschaft bei Simulationen über mehrere Dekaden meist von Klimaprojektionen und nicht von Klimavorhersagen.¹⁷

Moderne Klimamodelle können beobachtete Klimaentwicklungen der Vergangenheit zutreffend abbilden. Deshalb sind Schlussfolgerungen für die mögliche künftige Klimaentwicklung, die wir heute aus den Ergebnissen von Modellrechnungen ziehen können, eine verlässliche Grundlage für politische Entscheidungen.¹⁸

Globaler Klimawandel

6. Weltweite Erwärmung

Ozean, Land und Atmosphäre haben sich in den vergangenen Jahrzehnten fast überall deutlich erwärmt und zudem ebenfalls fast überall zur Abnahme der Eismassen geführt. Eine Ausnahme, die Abkühlung des subpolaren Atlantiks, wurde von Klimamodellen seit langem vorhergesagt¹⁹ und geht offenbar auf eine Abschwächung des Golfstromsystems zurück. Eine weitere Ausnahme ist die leichte Abkühlung im Süd-Ozean, deren Ursache noch ungeklärt ist. Das rasante Tempo und die weltweite Gleichzeitigkeit des Temperaturanstieges unterscheiden den heutigen menschengemachten Klimawandel von vorherigen natürlichen Veränderungen wie den Eiszeit-Warmzeit-Zyklen, der sogenannten Mittelalterlichen Warmzeit oder der kleinen Eiszeit.²⁰

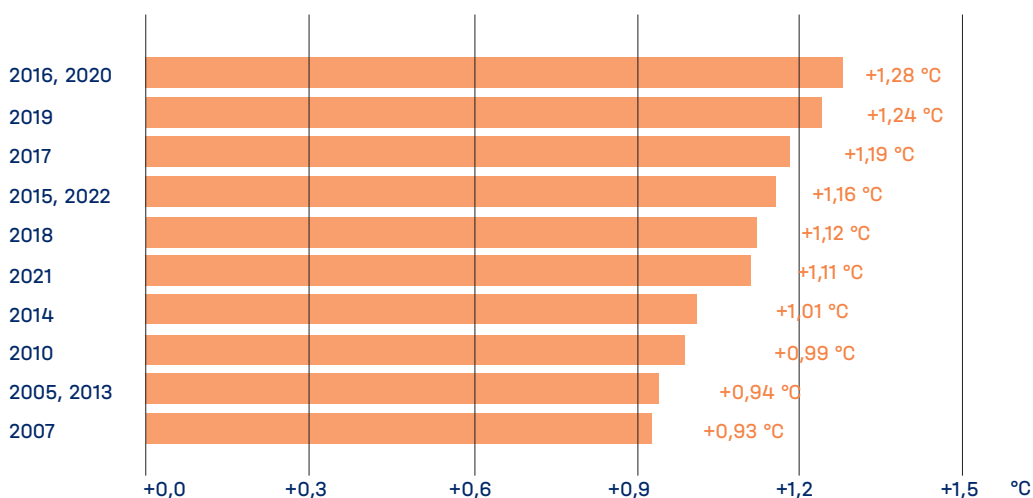
Die Temperatur nahe der Erdoberfläche hat sich gegenüber der vorindustriellen Zeit im globalen Mittel bereits um über 1,1°C erhöht.²¹ Ein solches Temperaturniveau gab es laut den verfügbaren paläoklimatischen Daten noch nie während der vergangenen 2.000 Jahre und sehr wahrscheinlich auch nie während der gegenwärtigen Warmzeit (dem Holozän), die vor knapp 12.000 Jahren begann – also noch nie im Laufe der Geschichte des modernen Menschen.²²

7. Beispiellose Häufung von Rekorden

Seit den 1980er Jahren war jede Dekade wärmer als die vorherige und wärmer als alle vorangegangenen Jahrzehnte seit 1850.²³ Auch die Dekade 2011 bis 2020 hat einen neuen Höchststand markiert. Alle zehn wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen traten seit 2005 auf.²⁴ 2022 war nach Daten der US-Behörde NOAA weltweit das 46. Jahr in Folge, in dem die Mitteltemperatur an der Erdoberfläche über dem Durchschnitt des 20. Jahrhunderts lag.²⁵

Die wärmsten Jahre weltweit

Abweichung in Bezug auf das Mittel zwischen 1881 und 1910 seit Beginn der Aufzeichnungen



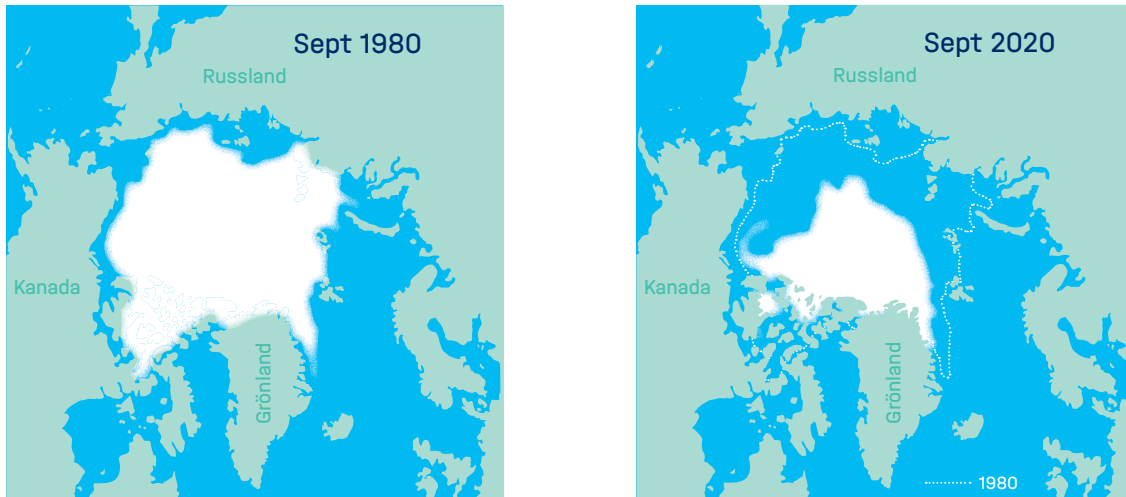
Quelle: NASA/GISS/GISTEMP

herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst,
Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de

8. Das Arktische Meereis schwindet

Meereisfläche im Polarmeer

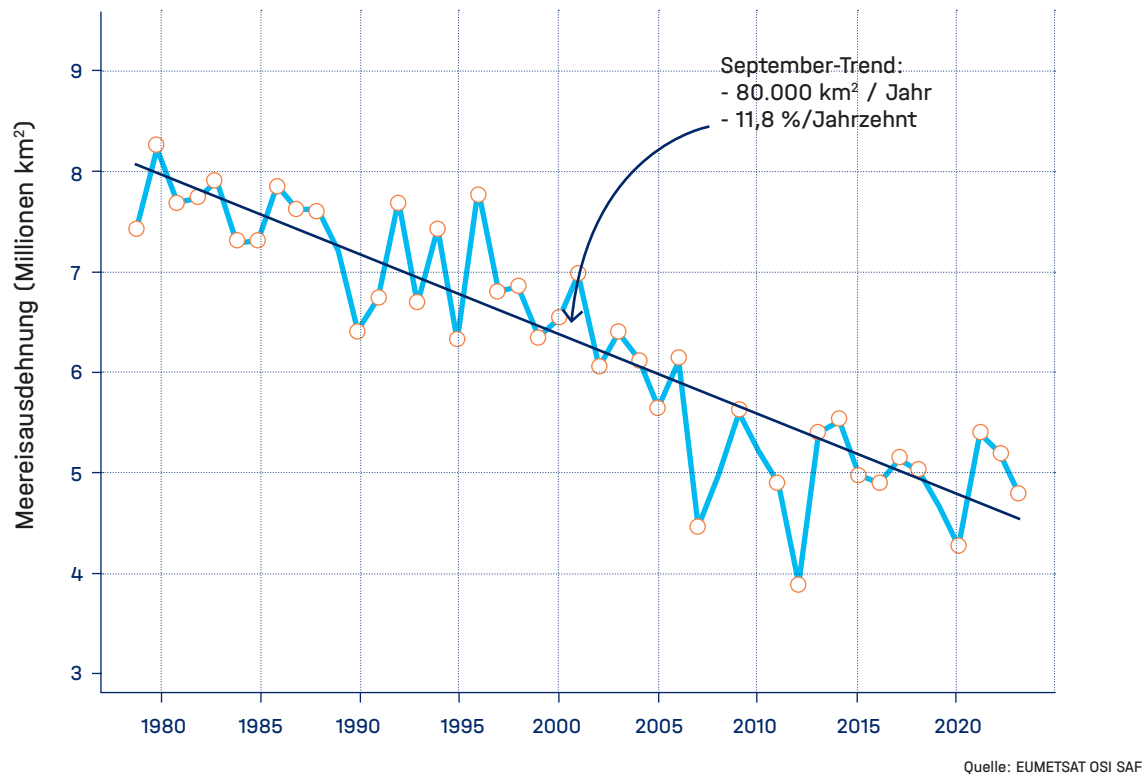


Quelle: Roessler, Team Polar and Cold Regions (DLR-EOC)

Betrug die minimale Ausdehnung des arktischen Meereises zwischen 1979 und 1992 noch rund 6,85 Millionen Quadratkilometer, so lag dieser Wert im Zeitraum 2007 bis 2020 nur noch bei rund 4,4 Millionen Quadratkilometern.

Das Meereis rund um den Nordpol schrumpft. Sowohl das Eisvolumen in der Arktis als auch die dort mit Eis bedeckte Ozeanfläche (die Maximalausdehnung am Ende des Winters ebenso wie das Minimum am Ende des Sommers) sind seit Beginn der Satellitenmessungen 1979 stetig zurückgegangen, und zwar um durchschnittlich mehr als zehn Prozent pro Dekade. Betrug die minimale Ausdehnung des arktischen Meereises zwischen 1979 und 1992 noch rund 6,1 Millionen Quadratkilometer, so lag dieser Wert im Zeitraum 2007 bis 2020 nur noch bei rund 4,4 Millionen Quadratkilometern.²⁶ Sehr stark schwindet das mehrjährige und damit besonders dicke Eis, weshalb die verbleibende Eisfläche zusehends empfindlicher auf die Erwärmung reagiert.²⁷

Monatliche Meereisausdehnung September 1980–2023 in der Arktis

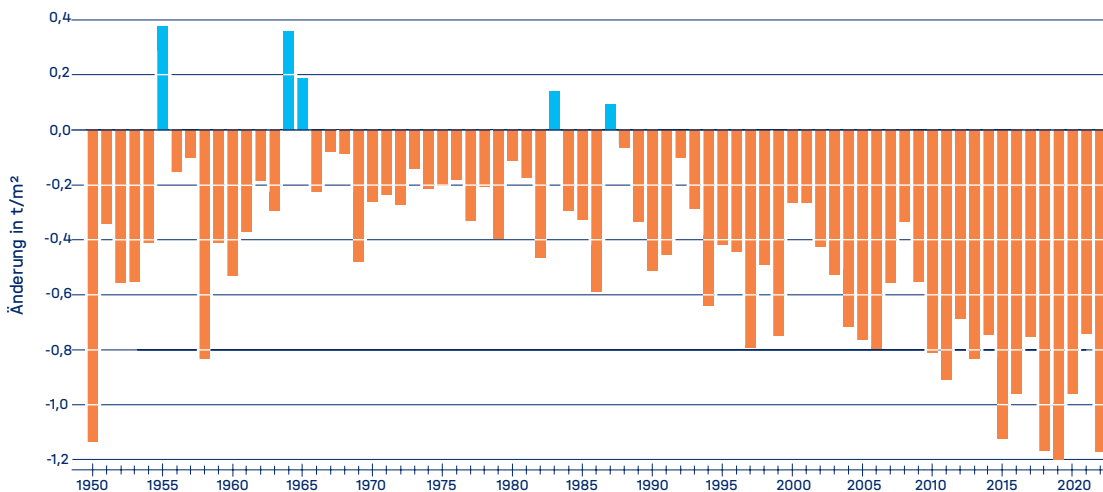


Im Gegensatz zur oben dargestellten Entwicklung in der Arktis, zeigt die Ausdehnung des Meereises rings um den antarktischen Kontinent für den Zeitraum seit 1979 keinen statistisch signifikanten Trend. In den letzten Jahren wurden zwar Rückgänge beobachtet, aber gesicherte Aussagen sind noch nicht möglich.²⁸

9. Festland-Eis und Schneedecke schrumpfen

Die Eismasse auf Grönland schwindet jedes Jahr um mehr als 278 Milliarden Tonnen. Dies trägt seit 2006 mit mehr als sieben Millimetern pro Jahrzehnt zum Anstieg der durchschnittlichen globalen Meeresspiegelhöhe bei.²⁹ Das Tempo des Eisverlusts auf Grönland hat sich in den vergangenen Jahren stark beschleunigt. Zwischen 1981 und 2010 schmolz es im Juni und Juli an rund 15 Prozent der grönländischen Eisoberfläche, im Juni und Juli 2020 bereits an rund 25 Prozent.³⁰ Teile des antarktischen Eispanzers zeigen ebenfalls starke Verluste. Dort gehen seit 2006 etwa 155 Milliarden Tonnen Eismasse pro Jahr verloren (Beitrag zum Meeresspiegelanstieg: rund vier Millimeter pro Jahrzehnt).³¹

Jährliche Veränderung der Gletschermasse weltweit



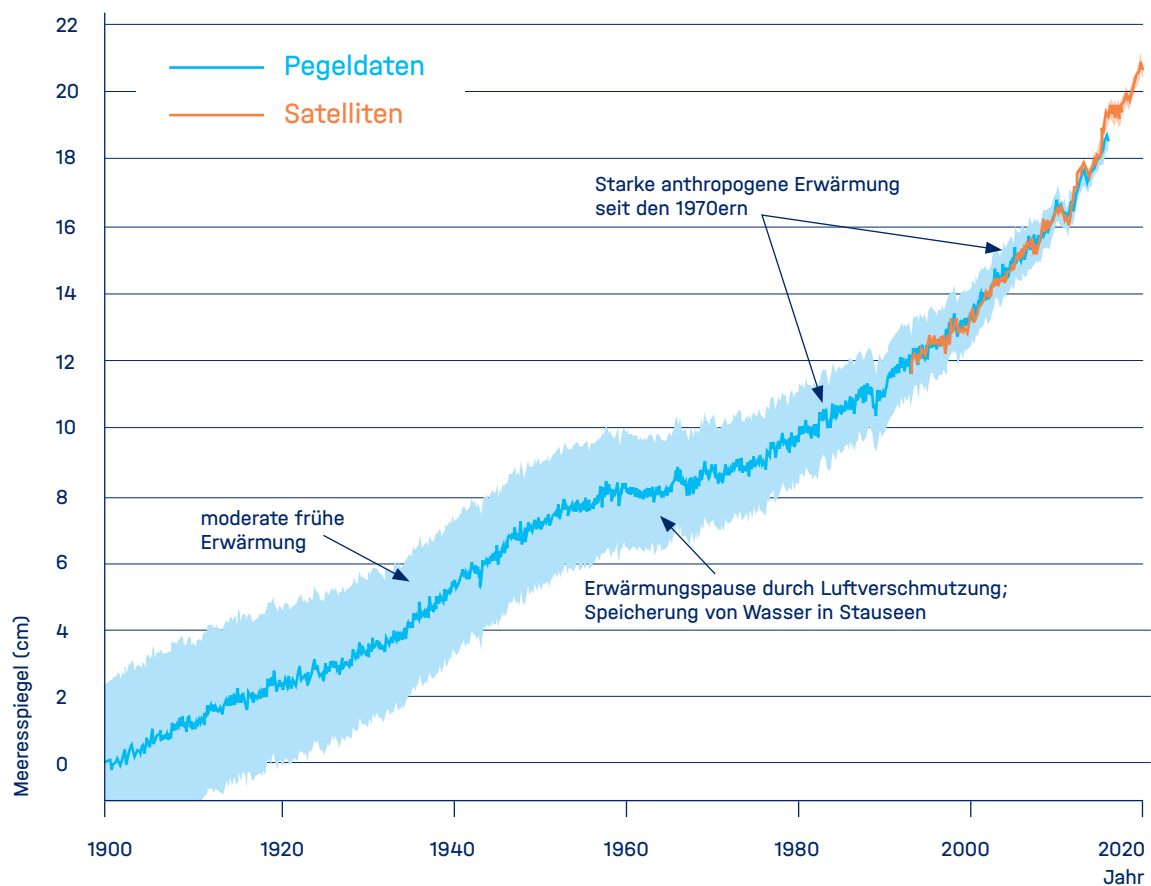
Quelle: World Glacier Monitoring Service

Auch die meisten Gebirgsgletscher schrumpfen. Obwohl einige wenige Gletscher aufgrund regionaler Besonderheiten wachsen, hat die globale Gesamtmasse der Gebirgsgletscher seit 1980 deutlich abgenommen – im Durchschnitt verschwand seitdem eine Eisschicht von mehr als 20 Metern Dicke.³² Eine derartige Entwicklung hat es seit Beginn der Aufzeichnungen noch nie gegeben.³³ Der Rekordverlust von Gletschereis hat dazu geführt, dass der südliche Schneeferner seit September 2022 nicht mehr als Gletscher, sondern nur noch als Toteis existiert. Damit gibt es in Deutschland nur noch vier Gletscher. Während ein Teil des Gletscherschwunds noch eine Nachwirkung der Erwärmung im Anschluss an die Kleine Eiszeit auf der Nordhalbkugel sein dürfte, ist seit einigen Jahrzehnten der menschengemachte Klimawandel die Hauptursache.³⁴ Auch die Dauer der Schneebedeckung ist in vielen Regionen in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zurückgegangen.³⁵

10. Der Meeresspiegel steigt – und zwar immer schneller und noch über Jahrhunderte

Zwischen 1880 und 2020 sind die Meeresspiegel im weltweiten Durchschnitt bereits um rund 20 cm gestiegen, allein seit Beginn globaler Messungen per Satellit 1993 um etwa neun Zentimeter.³⁶ Seit 2006 beträgt die Anstiegsrate jährlich knapp 3,7 Millimeter – mehr als doppelt so viel wie zuvor. Ursache dieser Beschleunigung ist – wie oben schon ausgeführt – die immer stärkere Schmelze der Eispanzer in Grönland und der Antarktis.³⁷

Meeresspiegelanstieg



Quelle: Sönke Dangendorf, Nature Climate Change 2019 Grafik: @rahmstorf, CC BY-SA 4.0 (angepasst)

Allerdings steigen die Pegel an den Küsten der Welt nicht überall gleich stark, es gibt regionale Abweichungen von bis zu plus oder minus 30 Prozent.³⁸ Ursache für die Unterschiede sind zum Beispiel Landmassen unter Deltas oder Städten, die stark absinken, ausgelöst durch menschliches Handeln wie durch das Abpumpen von Grundwasser, die Öl- und Gasförderung oder durch Sedimentverschiebungen. Etwa 58 Prozent der Weltküstenbevölkerung, die an oder auf absinkenden Deltas lebt, ist davon betroffen. Dort stieg der Meeresspiegel in den vergangenen 20 Jahren durchschnittlich sogar um 7,8 mm bis 9,9 mm pro Jahr an.³⁹

herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de

11. Ozeane versauern, Korallen sterben

Der Säuregrad von Flüssigkeiten wird durch den pH-Wert angegeben – je kleiner der pH-Wert, desto saurer die Flüssigkeit. Der pH-Wert des oberflächennahen Meerwassers liegt aktuell im weltweiten Mittel bei etwa 8,1 und ist gegenüber der vorindustriellen Zeit bereits um rund 0,1 gesunken. Diese Veränderung mag gering klingen, bedeutet jedoch (weil die pH-Skala logarithmisch ist) eine Zunahme des Säuregrades um 26 Prozent. Die Entwicklung bedroht unter anderem zahlreiche kalkbildende Meereslebewesen wie Korallen, Muscheln oder Krebse.⁴⁰

Grund dieser sogenannten „Versauerung“ der Meere sind die vom Menschen verursachten Emissionen von Kohlendioxid; seit den 1980er Jahren haben die Ozeane etwa 20 bis 30 Prozent davon aufgenommen.⁴¹ Wenn sich CO₂ in Meerwasser löst, reagiert es mit Wasser und bildet Kohlensäure. Sinkt der menschengemachte Ausstoß von Kohlendioxid nicht, könnte der pH-Wert bis Ende des Jahrhunderts auf Werte fallen, wie sie seit mehr als 50 Millionen Jahren nicht mehr in den Ozeanen vorkamen.⁴² Korallen leiden außerdem sehr stark unter den steigenden Temperaturen des Meerwassers.⁴³

12. Wetterextreme nehmen zu

Bestimmte Typen von Extremwetter-Ereignissen haben weltweit deutlich zugenommen. Die bereits beobachtete Erwärmung hat in den meisten Gebieten an Land bereits zu einer erhöhten Häufigkeit, Intensität und Dauer von Hitzewellen geführt. In manchen Gegenden sind auch Dürren häufiger und heftiger geworden, etwa im Mittelmeerraum, in Westasien, in vielen Teilen Südamerikas sowie in einem Großteil Afrikas und Nordostasiens. Zudem wurden lokale Starkniederschläge weltweit noch intensiver.⁴⁴ In Nordwest-Europa hat in den vergangenen Jahrzehnten das Risiko von Flusshochwassern zugenommen.⁴⁵ Bei tropischen Wirbelstürmen stieg zwar nicht die Gesamtzahl, wohl aber sind die stärksten von ihnen häufiger geworden: Der Anteil der von Satelliten bestimmten Hurrikane der stärksten Kategorien 3, 4 und 5 an allen Hurrikanen stieg von 1979 bis 2017 um ein Viertel, von 32 Prozent auf 40 Prozent.⁴⁶

Die Zunahme an Wetterextremen war von 2011 bis 2022 so hoch, dass sie ohne menschliches Zutun kaum erklärbar wäre. Größere Teile der Welt erleben immer stärkere Hitze, ständig gibt es neue Temperatur- und Regenrekorde über das rein statistisch erklärbare Maß hinaus. Besonders die Tropen sind stark von Hitze-Extremen betroffen. Mit fortschreitendem Klimawandel dürfte die Hitze auch in höheren Breitengraden häufiger extrem werden.⁴⁷

Der Temperaturanstieg, veränderte Niederschlagsmuster und die Zunahme mancher Wetterextreme beeinträchtigen bereits die Sicherheit der Lebensmittelversorgung: In vielen äquatornahen Regionen sind die Erträge etwa von Mais und Weizen gesunken (in Regionen höherer Breiten dagegen gab es bessere Ernten). In Afrika schadet der Klimawandel bereits der Viehzucht. Vielerorts bekommt die Landwirtschaft größere Probleme durch den Schädlingsbefall von Pflanzen.⁴⁸

In Folge der globalen Erwärmung werden verschiedene Extremwetter-Phänomene wahrscheinlicher. Die Attributionsforschung kann sogar für einzelne Ereignisse abschätzen, wie sehr der Klimawandel dazu beigetragen hat. Zum Beispiel wurde die Hitzewelle, die am 18. und 19. Juli 2022 erstmals zu Temperaturen über 40 °C im Raum London geführt hat, durch die Klimaerwärmung um mindestens das Zehnfache wahrscheinlicher. Inzwischen gelingt die Attribution auch für großflächige extreme Niederschlagsereignisse.⁴⁹

Klimawandel in Deutschland

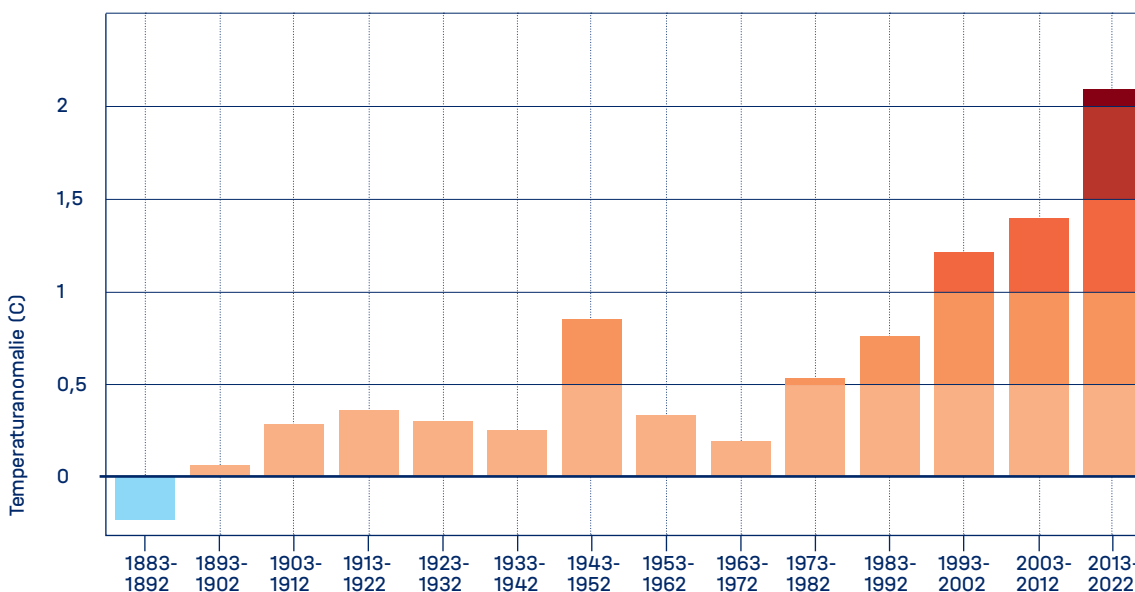
13. Bereits 2 °C Erwärmung – deutlich mehr als der weltweite Durchschnitt

Seit Beginn der systematischen, flächendeckenden Wetteraufzeichnungen 1881 hat sich die mittlere Temperatur der bodennahen Luft in Deutschland bereits deutlich erhöht. Laut Daten des Deutschen Wetterdienstes waren die zurückliegenden zehn Jahre (2013–2022) rund 2,1 °C wärmer als die ersten drei Jahrzehnte (1881–1910) der Aufzeichnungen. Die Temperaturen in Deutschland sind damit – wie über den meisten Landflächen – deutlich stärker gestiegen als im weltweiten Durchschnitt.⁵⁰

Das Tempo des Temperaturanstiegs hat in Deutschland (wie auch weltweit) in den vergangenen fünf Jahrzehnten deutlich zugenommen: Über den Gesamtzeitraum 1881–2022 gerechnet wurde es im Mittel um 0,12 °C pro Dekade wärmer, für die letzten 52 Jahre (1971–2022) lag die Erwärmungsrate mit 0,38 °C pro Dekade dreimal so hoch. Seit den 1960er Jahren war hierzulande jedes Jahrzehnt deutlich wärmer als das vorherige.⁵¹

Temperaturanomalie der Zehn-Jahresperioden

Deutschland
Referenzzeitraum 1881 – 1910



Quelle: DWD

herausgegeben von:

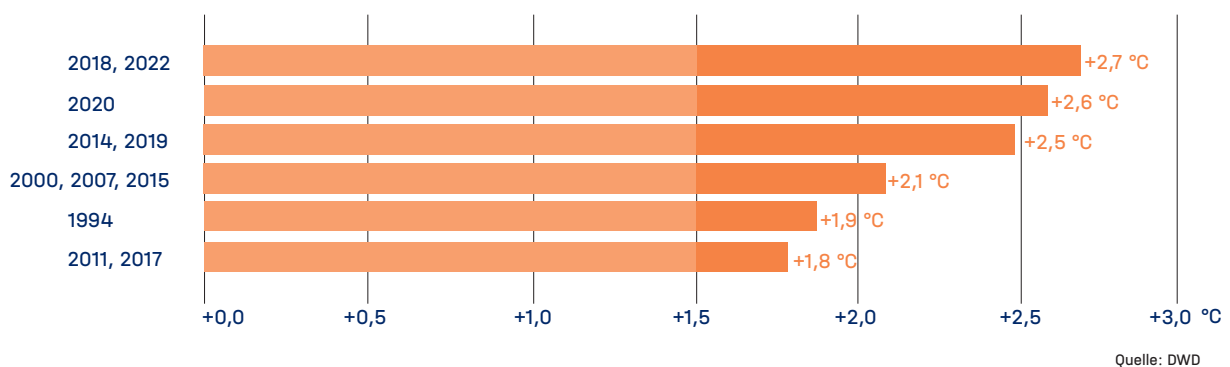
Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst,
Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de

14. Beispiellose Häufung von Wärme-Rekordjahren

Neun der zehn wärmsten Jahre seit 1881 in Deutschland sind nach dem Jahr 2000 aufgetreten. Acht Jahre waren bereits mehr als 2 °C wärmer als der langjährige Durchschnitt zu Beginn der Aufzeichnungen (1881-1910), fünf Jahre sogar 2,5 °C oder mehr.⁵² Eine derart außergewöhnliche Häufung von Rekordjahren der Temperatur ist nur durch die menschengemachte globale Erwärmung erklärbar; statistische Zufälle oder natürliche Ursachen (interne Schwankungen im Klimasystem oder natürliche Einflüsse von außen) fallen als Erklärung aus.⁵³

Die wärmsten Jahre in Deutschland

(Seit Beginn der Aufzeichnungen) Abweichung in Bezug auf 1881-1910



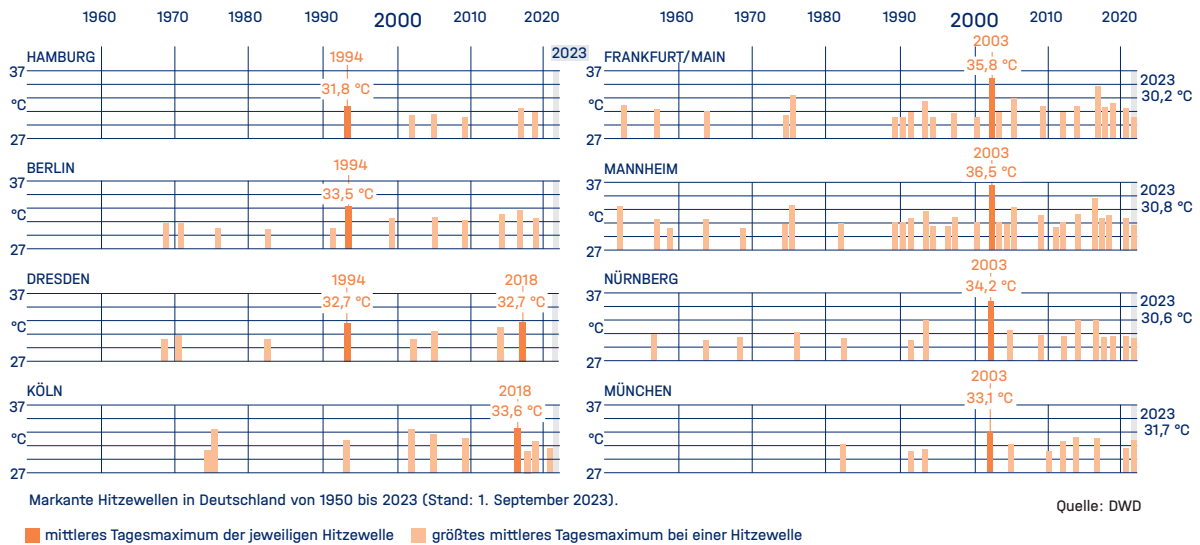
15. Mehr Hitze, weniger Frost

In den 1950er Jahren (1951-1960) gab es im bundesweiten Mittel pro Jahr etwa 3,5 sogenannte „Heiße Tage“ (So werden in der Meteorologie Tage, an denen die Lufttemperatur in 2 m Höhe auf 30 °C oder höher steigt genannt). Im Zeitraum 1991-2020 war die Anzahl „Heißer Tage“ bereits durchschnittlich 8,9 Tage pro Jahr. Demgegenüber nahm die mittlere Zahl der sogenannten „Eistage“ (Tage, an denen die Lufttemperatur in 2 m Höhe den ganzen Tag unter 0 °C bleibt) im gleichen Zeitraum von 28 auf 19 Tage pro Jahr ab.⁵⁴ In Hamburg zum Beispiel gab es im Winter 2019/2020 erstmals seit Aufzeichnungsbeginn keinen einzigen Eistag.⁵⁵

Auch die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen in Deutschland hat sich verändert; in vielen Regionen kommt es seit den 1990er Jahren zu einer massiven Häufung. 14-tägige Hitzeperioden mit einem mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30 °C traten zum Beispiel in Hamburg vor 1994 überhaupt nicht auf - danach gab es dort allerdings schon sechs. Bei ungebremstem Treibhausgasausstoß wird für den Zeitraum 2021 bis 2050 eine weitere Zunahme um fünf bis zehn Heiße Tage in Norddeutschland und um zehn bis 15 Heiße Tage in Süddeutschland erwartet.⁵⁶

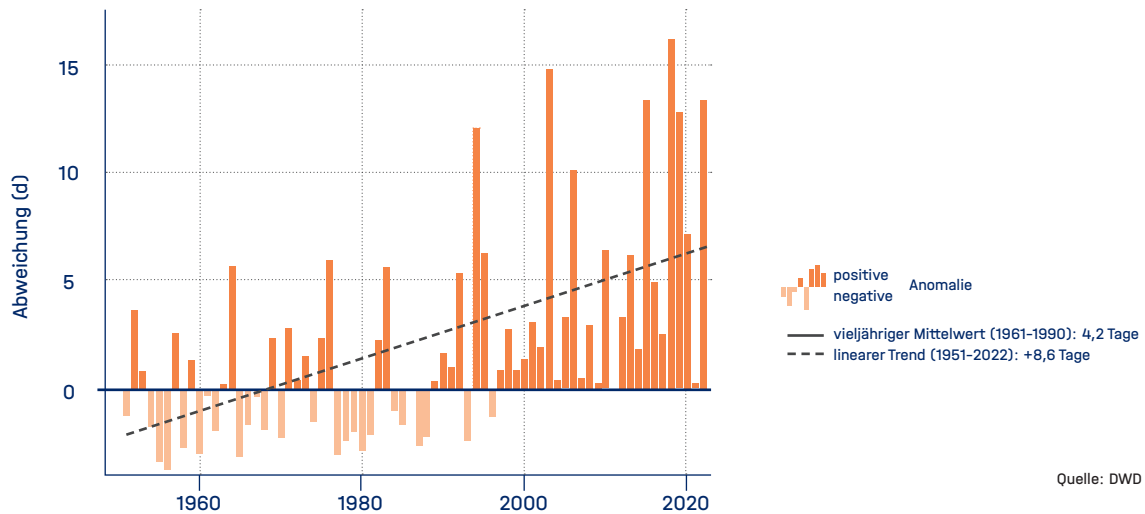
Markante Hitzewellen seit 1950

14-tägige Hitzeperioden mit einem mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30 °C für ausgewählte Großstädte



Anomalie der Anzahl der Heißen Tage

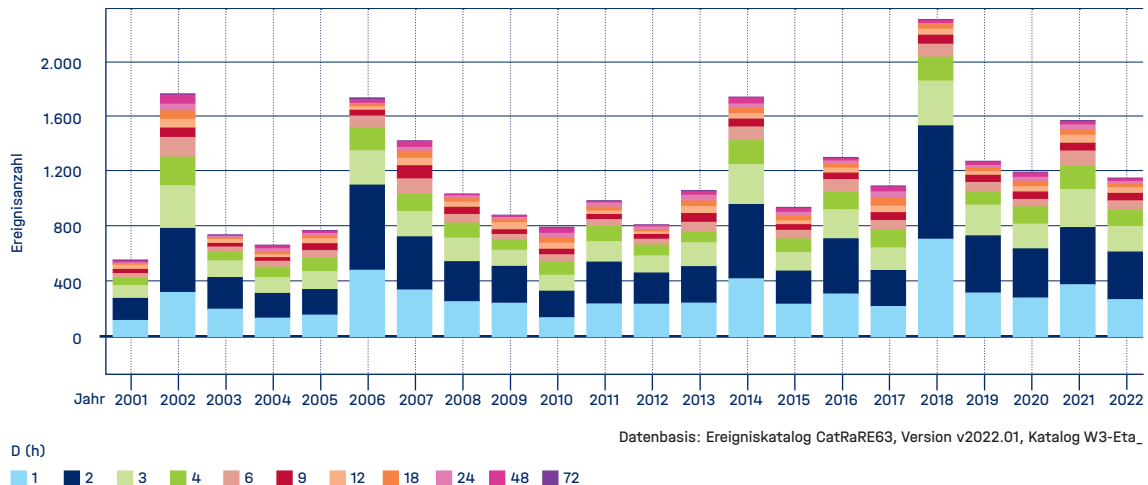
Deutschland, Jahr 1951-2022, Referenzzeitraum 1961-1990



16. Mehr Starkregen - und zugleich längere Trockenzeiten

Eine mögliche Folge des Klimawandels in Deutschland ist die Zunahme von Starkregenereignissen.⁵⁷ Zumindest die Daten der flächendeckenden Regenradare des DWD⁵⁸ liefern erste Indizien für eine Zunahme; weil diese Datenreihe aber noch zu kurz ist, kann die Zunahme noch nicht statistisch gesichert nachgewiesen werden. Eine Zunahme entspräche auch dem physikalischen Grundverständnis, wonach die erhöhte Wasserdampfaufnahme der Atmosphäre durch die globale Erwärmung konvektive Niederschläge verstärken könnte. Es gibt zudem Hinweise, dass im Sommer die Zahl aufeinanderfolgender Trockentage zunehmen könnte. Beide Tendenzen hätten zur Folge, dass sich hydroklimatische Gefahren wie Dürren und Überschwemmungen erhöhten.⁵⁹

Zumindest der Trend zu intensiveren Starkregenereignissen wird für die Zukunft prognostiziert.⁶⁰ Die bodennahe relative Feuchte der Luft hat abgenommen und wird weiter abnehmen, so dass auch bei gleichbleibenden Niederschlägen der Boden vermehrt austrocknet.⁶¹ Laut Daten des DWD hat die Zahl von Tagen mit niedriger Bodenfeuchte seit 1961 bereits deutlich zugenommen; besonders betroffen von der zunehmenden Bodentrockenheit sind der Nordosten Deutschlands sowie das Rhein-Main-Gebiet.⁶²



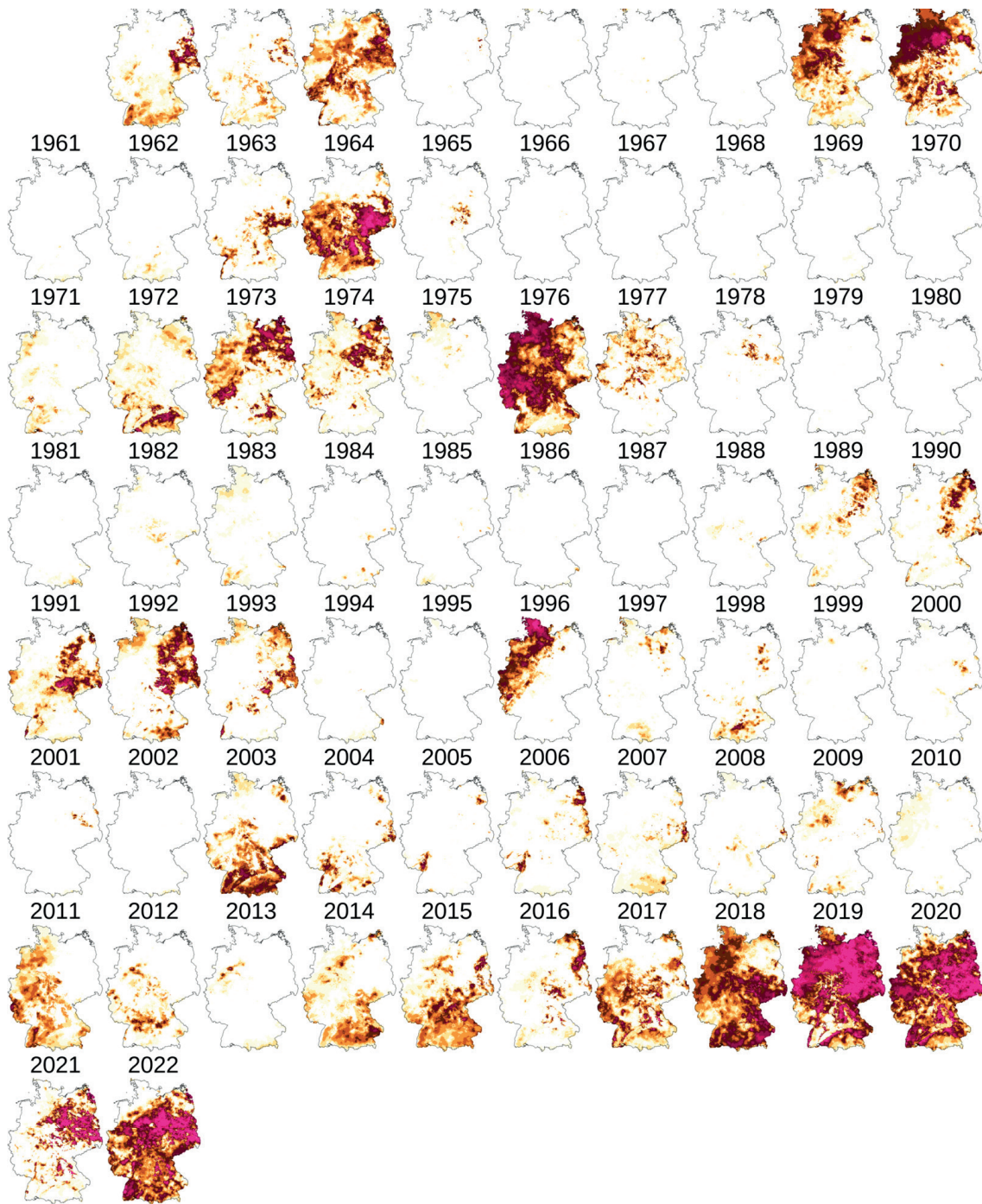
Verteilung der Starkregenereignisse über die Jahre 2001 bis 2022 in Deutschland anhand der jährlichen Ereignisanzahl in Abhängigkeit von der Dauerstufe.

Auch wenn es bislang keinen eindeutigen Nachweis dafür gibt, dass verminderte Niederschläge über Deutschland mit dem anthropogenen Klimawandel zusammenhängen, ist es bemerkenswert, dass die trockenen Jahre 2018 bis 2020 beispiellos für die vergangenen 250 Jahre waren.⁶³ Seit 1766 hat es in Mitteleuropa keine dreijährige Sommer-Dürre dieses Ausmaßes gegeben; mehr als 50 Prozent des Ackerlandes waren davon betroffen.⁶⁴ Diese extrem ungewöhnliche Trockenheit setzte sich in vielen Regionen auch 2022 fort, sodass das „normale“ Jahr 2021 für eine durchgreifende Entspannung nicht reichte. Der Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung in Leipzig zeigt, dass der Gesamtboden in weiten Teilen Deutschlands das sechste Trockenjahr in Folge während der Vegetationsperiode erlebt.⁶⁵

Zahlreiche Wirtschaftsbranchen bekommen die Auswirkungen von Dürren zu spüren, etwa Energieerzeugung und Industrie.⁶⁶ Während der extrem trockenen Sommer 2018, 2019 und auch 2022 sanken zum Beispiel die Wasserstände von Rhein und Elbe so stark, dass Binnenschiffe über Wochen oder gar Monate nur eingeschränkt oder gar nicht fahren konnten. Wegen der Verkehrseinschränkungen mussten am Rhein zum Beispiel Raffinerien und Chemiewerke ihre Produktion reduzieren.⁶⁷ Weil es an Kühlwasser mangelte, wurden Kohle- und Atomkraftwerke zeitweise in ihrer Leistung gedrosselt.⁶⁸ Die wirtschaftlichen Schäden für die betroffenen Branchen betragen hunderte Millionen Euro.⁶⁹

Geht der Klimawandel ungebremst weiter, wird mit einer starken Risikozunahme in Bezug auf Trockenheit und deren Folgen gerechnet. Zunehmende Konflikte bei der Wassernutzung zwischen den Verbrauchergruppen (Industrie, Landwirtschaft, Ökologie, Bevölkerung) sind absehbar und werden sich mit anhaltender Erwärmung und in der Folge erhöhter Verdunstung verschärfen. Eine globale Erwärmung um weitere 3 °C würde zum Beispiel für Teile Südwestdeutschlands gegenüber dem Zeitraum 1971 bis 2000 eine Verdoppelung der Zeiten unter Dürre bedeuten.⁷⁰

Jährliche Dürrestärke im Gesamtboden 1952-2022 in Deutschland



Quelle: UFZ-Dürremonitor/ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Friedrich Boeing

- ungewöhnlich trocken
- moderate Dürre
- schwere Dürre
- extreme Dürre
- außergewöhnliche Dürre

herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst,
Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de

17. Pflanzen und Tiere reagieren sensibel auf die Erwärmung

Weltweit hat der Temperaturanstieg bereits zu einer Verschiebung von Klimazonen geführt und damit zu teils tiefgreifenden Veränderungen der Verbreitungsgebiete von Pflanzen und Tieren.⁷¹ Auch in Deutschland ist zu beobachten, dass sich verschiedene Pflanzen in neue Regionen ausbreiten, etwa das ursprünglich aus dem Mittelmeerraum stammende Affen-Knabenkraut nach Norden oder die schon länger im Westen Deutschlands heimische Stechpalme nach Norden und Osten. Dasselbe ist auch bei krankheitsübertragenden Insekten wie der Asiatischen Tigermücke zu beobachten. Der Klimawandel verändert zudem Entwicklungsphasen von und Wechselbeziehungen zwischen Organismen: Zugvögel kommen früher zurück, bei Fischen wurde eine frühere Laichzeit nachgewiesen. Blühzeitpunkte von Pflanzen verschieben sich, sodass sie nicht mehr so gut zum Lebenszyklus der sie bestäubenden Insekten passen.⁷²

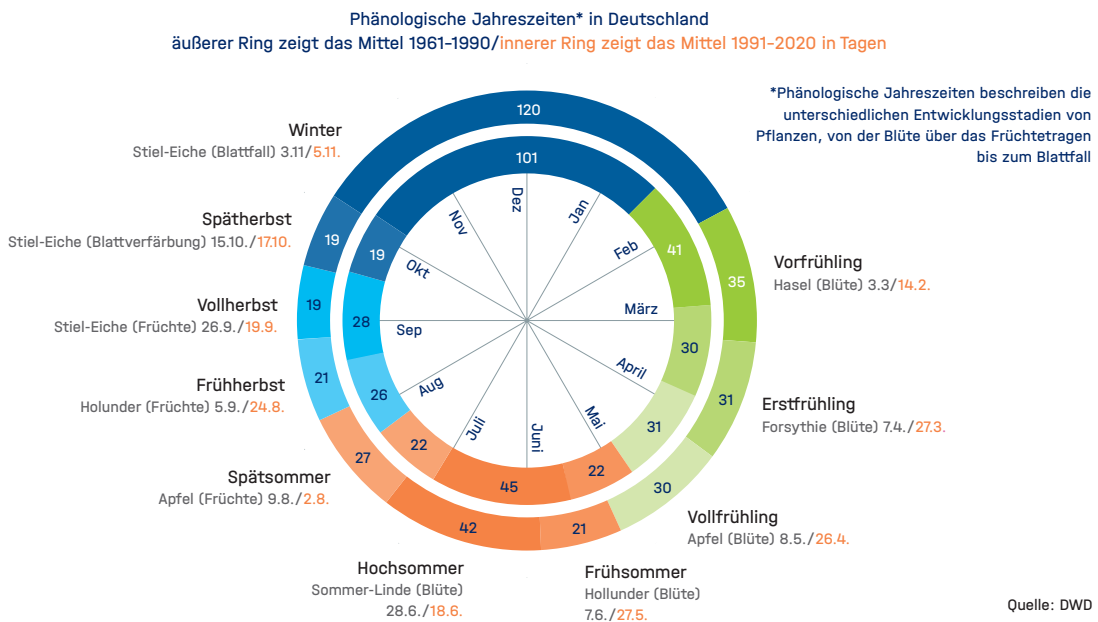
Auswirkungen des Klimawandels auf Pflanzen und Tiere



- Zugvögel**
- » kommen früher zurück
 - » Eiablage beginnt früher
 - » Verhaltensmuster verändern sich



- Pflanzen**
- » Hohe Temperaturen und Wärme verlängern die Vegetationsperiode: Pflanzen fangen früher an zu blühen
 - » Lebensrhythmen von Pflanzen und bestäubenden Insekten verändern sich
 - » früherer Pollenflug, größere Pollenmenge, aggressiver für Allergiker:innen



Daten des Deutschen Wetterdienstes belegen, wie sich insgesamt die Vegetationsphasen verändert und verschoben haben: Der sogenannte phänologische Frühling beginnt heute im Mittel schon rund zwei Wochen früher als vor einigen Jahrzehnten. Der phänologische Herbst beginnt eher und dauert länger. Hingegen hat sich der phänologische Winter von durchschnittlich 120 Tagen pro Jahr auf nur noch 102 Tage verkürzt.⁷³

Der Klimawandel bedroht auch die Artenvielfalt. Eine Analyse von 500 ausgewählten heimischen Tierarten im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz ergab, dass der Klimawandel für 63 von ihnen ein hohes Risiko darstellt auszusterben; am stärksten betroffen sind Schmetterlinge, Weichtiere (z. B. Schnecken) und Käfer.⁷⁴

18. Land- und Forstwirtschaft leiden bereits unter dem Klimawandel

Im Vergleich zu den 1970er Jahren blühen zum Beispiel Apfelbäume heute rund 13 Tage zeitiger – doch weil es so früh im Jahr nachts häufig noch sehr kalt wird und die Blüten frostempfindlich sind, haben Obstbäuerinnen und -bauern häufiger schwere Frostschäden zu beklagen (wie es etwa im Frühjahr 2017 der Fall war).⁷⁵ Die Trockenheit der vergangenen Jahre führte regional zu deutlichen Ernteeinbußen – zum Beispiel lagen im Dürrejahr 2018 die Erträge bei Getreide um 18 Prozent unter dem Mittel; am stärksten betroffen waren Schleswig-Holstein (-31 Prozent), Brandenburg (-27 Prozent) und Sachsen-Anhalt (-26 Prozent). Auch fehlender Frost wird für die Landwirtschaft ein Problem: Viele Ackerkulturen, etwa Winterweizen, brauchen in einer bestimmten Wachstumsphase (dem „Schossen“) einen Kältereiz – fehlt dieser, leiden die Ernten.

Trockenstress durch geringere Sommerniederschläge und durch einen erhöhten Wasserbedarf aufgrund der höheren Temperaturen, die beschleunigte Entwicklung von Schadinsekten und die zunehmende Gefahr von Waldbränden bedrohen die Forstwirtschaft. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft schätzt, dass nach den Trockenjahren 2018, 2019 und 2022 bundesweit mindestens 380.000 Hektar Wald wiederaufgeforstet werden müssen.⁷⁶

19. Die Waldbrandgefahr nimmt zu

Wärmere Sommer und längere Trockenphasen verstärken das Risiko von Waldbränden. In den vergangenen Jahrzehnten ist die Zahl der Tage mit hoher Waldbrandwarnstufe bereits gestiegen: Nach Auswertungen des DWD auf Basis des Waldbrandgefahrenindex WBI gab es deutschlandweit gemittelt im Zeitraum 1961 bis 1990 rund fünf Tage pro Jahr mit hohem oder sehr hohem Waldbrandrisiko. Im Zeitraum 1991 bis 2020 waren es rund zehn Tage pro Jahr. Auffallend ist die besonders hohe Anzahl der Tage mit Waldbrandgefahr in den Jahren 2018, 2019, 2020.⁷⁷

20. Binnenseen in Deutschland sowie Nord- und Ostsee sind deutlich wärmer geworden

Die Erwärmung betrifft die Seen in den Alpen und im Alpenvorland ebenso wie die Seen in den Mittelgebirgen oder im Norddeutschen Tiefland. Wegen des Temperaturanstiegs verändert sich die Artenvielfalt in den Seen, und es kommt häufiger zu Fischsterben und Algenblüten, die auch für badende Menschen eine Gesundheitsgefahr darstellen können.⁷⁸

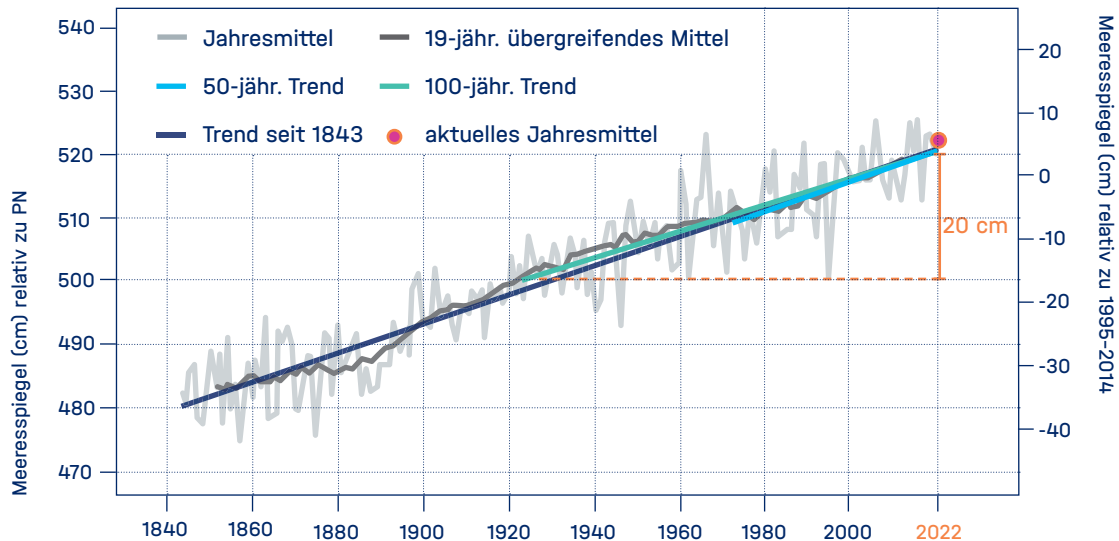
Die mittlere Oberflächentemperatur der Nordsee in der Deutschen Bucht hat sich zwischen 1969 und 2017 um etwa 1,3 °C erhöht. Vor der deutschen Ostseeküste wurde seit 1982 ein mittlerer Anstieg der Wassertemperaturen um rund 1,6 °C gemessen, wobei die Werte durch die geringere Durchmischung nach Ort und Wassertiefe teils stark von diesem Mittel abweichen können.⁷⁹

21. Der Meeresspiegel steigt auch an den deutschen Küsten von Nord- und Ostsee

Meeresspiegelanstieg seit 1843

Pegel Cuxhaven

PN bezeichnet den sog. Pegel Null für Cuxhaven, der bei 5 Meter unter der Referenzhöhe Normalnull (NN) mit 0 Metern beginnt.

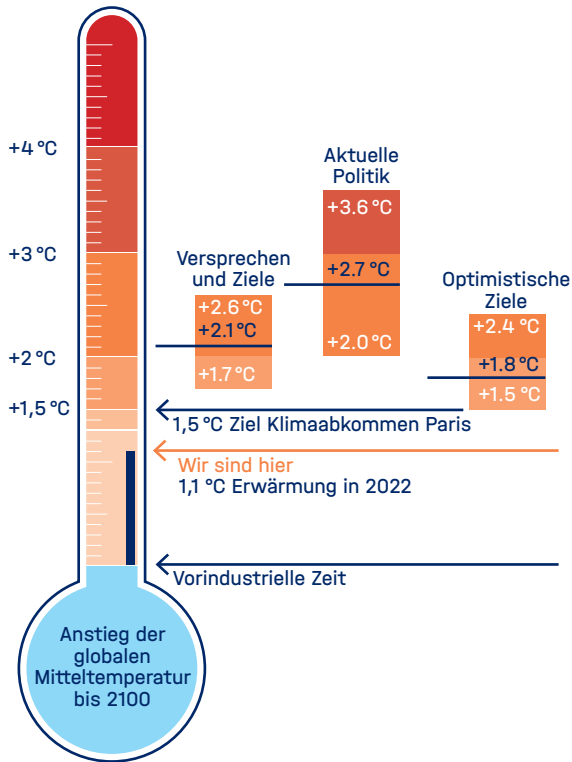


Quelle: Meeresspiegelmonitor

Der Meeresspiegel am Pegel Cuxhaven zum Beispiel hat seit Mitte des 19. Jahrhunderts bereits um gut 40 Zentimeter zugelegt, am Pegel Travemünde um rund 30 Zentimeter.⁸⁰ Allein in den vergangenen hundert Jahren betrug der Anstieg in Cuxhaven im Mittel 18 Zentimeter (siehe Grafik). Folgen sind unter anderem höher auflaufende Sturmfluten in der Nordsee.⁸¹

Künftige Entwicklung

22. Das 1,5 °C-Limit werden wir wahrscheinlich verfehlen



Bei ungebremsten globalen Emissionen könnte bis Ende des Jahrhunderts die Erwärmung im weltweiten Durchschnitt mehr als 4 °C betragen.⁸² Auf dem UN-Klimagipfel von Paris im Jahr 2015 wurde beschlossen, dass der globale Temperaturanstieg auf „deutlich unter 2 °C“ gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden soll, möglichst sogar auf 1,5 °C. Setzt sich der derzeitige Erwärmungstrend fort, so wird die 1,5 °C-Grenze jedoch bereits in gut einem Jahrzehnt überschritten werden.⁸³

Bei unveränderter Fortdauer von Treibhausgasemissionen besteht nur noch eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass eine Erwärmung der Atmosphäre um 1,5 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit verhindert werden kann. Wollen sie das Übereinkommen von Paris umsetzen, müssen die Staaten weltweit ihre Klimaschutzanstrengungen schnell und drastisch verstärken. Nach den aktuellen Vorgaben der Politik würde bis Ende des Jahrhunderts immer noch ein Anstieg um rund 3 °C erfolgen. Selbst die Einhaltung aller bisherigen Zusagen der Regierungen für Emissionsminderungen genügen lediglich für eine Begrenzung der Erwärmung auf rund 2 °C.⁸⁴ Daran ändern auch die kurzzeitigen Verringerungen der Treibhausgas-Emissionen während der Covid19-Pandemie nichts.⁸⁵

Das vom Menschen ausgestoßene Kohlendioxid bleibt sehr lange in der Luft.⁸⁶ Die Folgen der bereits vom Menschen verursachten Erwärmung werden sich deshalb für Jahrhunderte bis Jahrtausende fortsetzen. Sie wird langfristige Änderungen im Klimasystem bewirken, wie einen weiteren Meeresspiegelanstieg oder Verluste an Artenvielfalt - und damit verbundene, schwerwiegende Folgen für den Menschen.⁸⁷

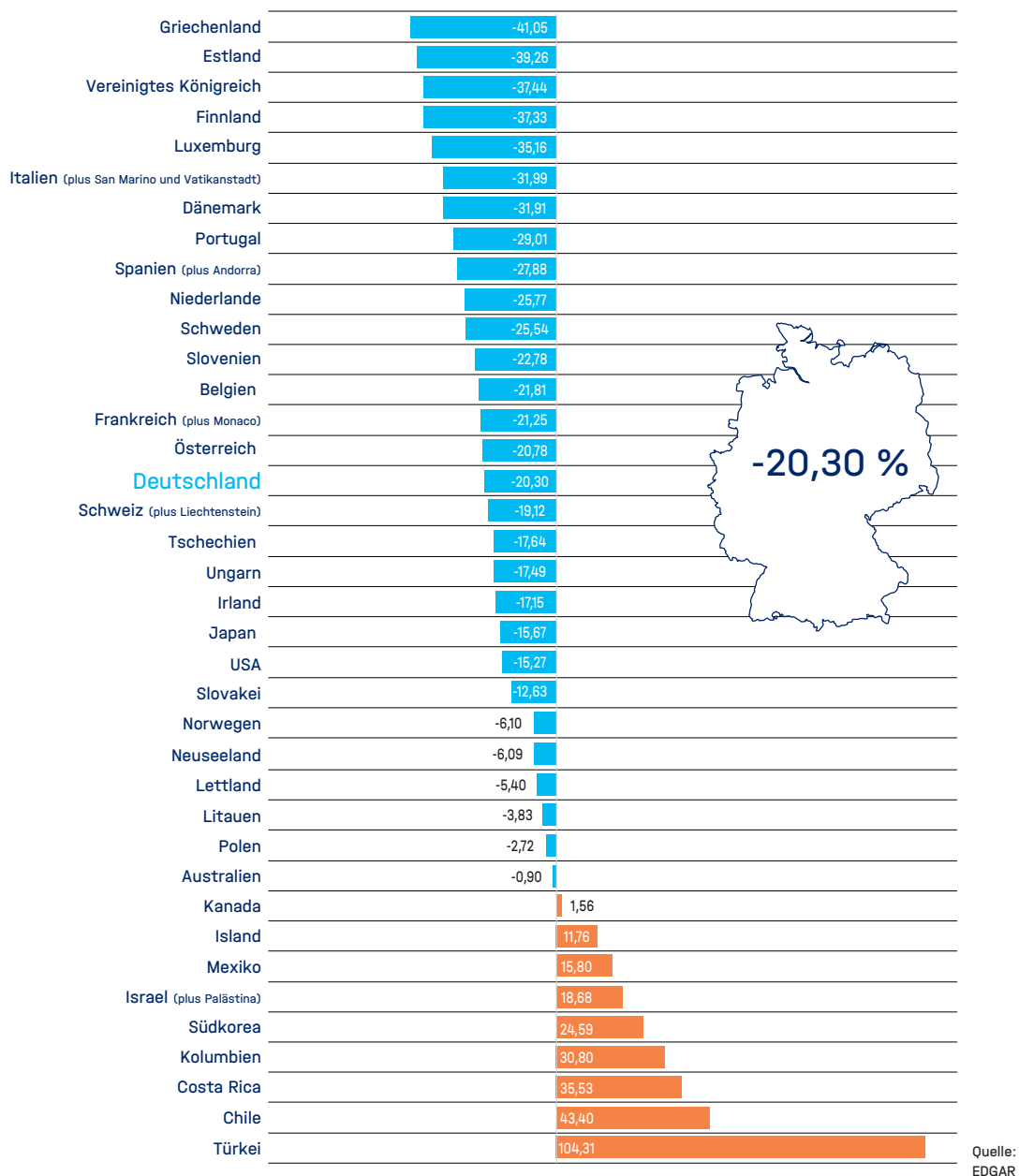
23. Starke Emissionssenkungen sind möglich

Auch wenn es zweifellos eine große Herausforderung ist: Schnelle und drastische Minderungen der Treibhausgas-Emissionen sind möglich, das zeigen zahlreiche Studien. Viele der dafür notwendigen Technologien existieren und sind teilweise bereits unter den heutigen politischen Rahmensetzungen finanziell konkurrenzfähig.⁸⁸

Etliche Staaten haben in den vergangenen Jahren ihren Ausstoß an Treibhausgasen erheblich gesenkt. So gelang es beispielsweise Griechenland, Estland, dem UK, Finnland und Luxemburg zwischen 2005 und 2022 die Emissionen um mehr als ein Drittel zu mindern (siehe Grafik). Belgien und Schweden haben den Kohleausstieg bereits vollzogen. In den kommenden Jahren wollen weitere Länder, etwa Großbritannien, Irland und Italien, folgen.⁸⁹

Veränderung der Treibhausgas-Emissionen der 38 OECD-Mitgliedstaaten

Unterschied zwischen 2005 und 2022 in Prozent



herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de

24. Unumkehrbare Veränderungen

Wichtige Elemente des Klimawandels sind – in Zeiträumen von mehreren menschlichen Generationen – unumkehrbar. Die sehr lange Lebensdauer von CO_2 in der Atmosphäre bewirkt, dass die globale Erwärmung (sofern der Atmosphäre nicht in großem Maße CO_2 wieder entzogen wird) selbst nach einem Stopp aller Emissionen weiter andauert. Weil Eismassen und Ozeane träge auf die globale Erwärmung reagieren, wird sich zum Beispiel die Tiefsee noch lange Zeit weiter erwärmen, Gletscher werden weiter schmelzen, die Meeresspiegel weiter steigen. Zudem gibt es Kippunkte im Klimasystem: das sind kritische Schwellen z. B. in der Temperatur, jenseits derer sich ein Teil des Klimasystems – ein sog. Kippelement – neu organisiert, gegebenenfalls abrupt und/oder unumkehrbar.⁹⁰

Eisschilde reagieren empfindlich, selbst auf moderate Temperaturänderungen. Ein Beispiel ist der Eispanzer auf Grönland: Er ist gegenwärtig kilometerdick, so dass die Oberfläche in einer Höhe liegt, in der es (wie im Gebirge) kalt ist. Schmilzt er, sinkt die Oberfläche in wärmere Luftschichten und schmilzt immer schneller. Bei einer Erwärmung von 2 °C bis 3 °C könnte das Eis auf Grönland und der Westantarktis über Zeiträume von mehreren Jahrtausenden vollständig und unumkehrbar abschmelzen. Als weiteres Kipp-Element gilt die Vernichtung des Amazonas-Regenwalds, die bis Ende dieses Jahrhunderts möglich ist, insbesondere wenn neben dem Einfluss des Klimawandels die Abholzung weiter fortschreitet. Manche Kipp-Elemente verstärken die globale Erwärmung zusätzlich, weil durch sie weitere Treibhausgase freigesetzt werden. Dies gilt etwa für das Tauen von Permafrostböden, wodurch große zusätzliche Mengen Methan oder Kohlendioxid freigesetzt werden könnten.⁹¹ Die menschengemachten Treibhausgasemissionen bleiben jedoch die dominante Ursache des Klimawandels, und deren Minderung auch das effektivste Mittel ihm und seinen Folgen zu begegnen. Der 2023 erschienene Synthesebericht des IPCC warnt, dass das Risiko durch Überschreiten von Kippunkten, wie etwa Eisschild-Instabilität oder Verlust von Ökosystemen in den tropischen Wäldern, zwischen 1,5 und 2,5 °C Erwärmung von „moderat“ auf „hoch“ steigt.

25. Jedes Zehntelgrad zählt



Selbst scheinbar geringe globale Erwärmungen könnten schwerwiegende Folgen haben. Wenn sich die Erde zum Beispiel um 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau erwärmt, werden voraussichtlich 70 bis 90 Prozent der weltweiten Korallenriffe absterben – bei 2 °C praktisch alle (98 bis 99 Prozent).⁹² Ein zeitweise eisfreier Nordpol ist bei 1,5 °C Erwärmung rund alle 40 Jahre zu erwarten – bei 2 °C jedoch alle drei bis fünf Jahre.⁹³ Eine Sturmflut, wie sie bisher an der Nordseeküste bei Cuxhaven statistisch alle 500 Jahre auftritt, könnte bei 1,5 °C Erwärmung einmal in hundert Jahren auftreten – bei 2 °C jedoch alle 33 Jahre.⁹⁴

Die globale Erwärmung auf höchstens 1,5 °C zu begrenzen, wird zunehmend schwieriger. Laut IPCC dürfen wir dazu ab 2020 noch etwa 400 Gigatonnen Kohlendioxid ausstoßen.⁹⁵ Allein im Jahr 2021 betrug die menschengemachten CO₂-Emissionen weltweit um die 36 Gigatonnen.⁹⁶ Würde dieses Emissionsniveau beibehalten werden, wäre das Restbudget also in wenigen Jahren aufgebraucht.⁹⁷ Wenn die Menschheit trotz Emissionsminderungen mehr als dieses Restbudget ausstößt, müssen wir der Atmosphäre zusätzlich bereits ausgestoßene Treibhausgase wieder entziehen, wenn wir die Erwärmung auf unter 1,5 °C begrenzen wollen. Fachleute sprechen hier von „negativen Emissionen“. Möglich wäre dies zum Beispiel durch großflächige Aufforstungen oder neue Technologien. Die Umsetzbarkeit und mögliche negative Nebenwirkungen werden derzeit intensiv erforscht.

Der IPCC schrieb deshalb 2018 im Vorwort zu seinem Sonderbericht über 1,5 °C globale Erwärmung: „Jedes Bisschen an Erwärmung zählt.“⁹⁸

Quellenangaben

- 1 Eine Kurzzusammenfassung des Forschungsstandes in nur zehn (englischen) Worten stammt von Anthony Leiserowitz von der Yale University: „It’s real. It’s us. Experts agree. It’s bad. There’s hope.“ – siehe: <https://www.youtube.com/watch?v=TbtVXWnrN9o> zu Punkt 4 siehe u.a.: <https://www.klimafakten.de/konsens>; <https://www.dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/126/1912631.pdf>
- 2 <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-12-3.html>
- 3 IPCC, AR6, 2021-2022, WG I – https://www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen_AR6-WGI.pdf https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf
- 4 siehe u.a.: IPCC 2014, AR5 SYR, Kap. 1.2.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf; IPCC 2014, AR5, WG3, FAQ 1.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR5_WG3_FAQ_barrierefrei.pdf; IPCC 2019, SRCCL, Kap.2.3 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/08/05_Chapter-2-V3.pdf https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf
- 5 <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>
- 6 IPCC, AR6, 2021-2022, WG I – https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid->
- 7 IPCC 2014, AR5 SYR, Kap. 1.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf; <https://www.nature.com/articles/s41598-020-67154-8>
- 8 https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/ch4/ch4_annmean_gl.txt <https://www.carbonbrief.org/scientists-concerned-by-record-high-global-methane-emissions>
- 9 https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/n2o/n2o_annmean_gl.txt
- 10 IPCC, AR6, 2021-2022, WG I - IPCC 2021, AR6, WG1, Kap. 7.2.2.2 https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf
- 11 vgl. z.B. <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Proxydaten>; IPCC 2013, AR5, WG1, Kap. 5 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter05_FINAL.pdf
- 12 IPCC, AR6, 2021-2022, SPM – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf
- 13 <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-die-sonne-verursacht-den-klimawandel#lang>
- 14 IPCC, AR6, 2021-2022, WG I – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf
- 15 <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-11-2.html>; <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-5-1.html>
- 16 Jenkins, S., Smith, C., Allen, M., & Grainger, R. (2023). Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5° C. Nature Climate Change, 13(2), 127-129; Zhang, H., Wang, F., Li, J. et al. (2022). Potential Impact of Tonga Volcano Eruption on Global Mean Surface Air Temperature. J Meteorol Res 36, 1-5.
- 17 <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-klimamodelle-sind-nicht-verlaesslich>; zur Klimasensitivität bei CMIP6-Modellrechnungen: <https://www.klimanavigator.eu/dossier/artikel/086719/index.php>, <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>
- 18 <https://klimasimulationen.de/modelle/> <https://klimanavigator.eu/dossier/artikel/011977/index.php> <https://www.helmholtz-klima.de/klimamodelle-wie-das-klima-der-zukunft-berechnet-wird>
- 19 IPCC, AR6, 2021-2022, WG I – https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- 20 IPCC, AR6, 2021-2022, WG I – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf
- 21 IPCC, AR6, 2021-2022, WG I – https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf
- 22 <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202012>
- 23 IPCC, AR6, 2021-2022, WG I, A.1.2. – https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- 24 <https://www.noaa.gov/news/2020-was-earth-s-2nd-hottest-year-just-behind-2016>; siehe auch wmo 2020: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10444
- 25 <https://earthobservatory.nasa.gov/images/147794/2020-tied-for-warmest-year-on-record>
- 26 <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2020/ArtMID/7975/ArticleID/891/Sea-Ice>
- 27 IPCC 2018, SROCC, SPM, A.1.4 – <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policy-makers/>
- 28 IPCC 2018, SROCC, SPM, A.1.4 – <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policy-makers/>
- 29 IPCC 2018, SROCC, SPM, A.1.1 – <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policy-makers/>
- 30 <http://nsidc.org/greenland-today/> – <http://nsidc.org/greenland-today/greenland-today-data-and-analysis-tools/>
- 31 IPCC 2018, SROCC, SPM, A.1.1 – <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policy-makers/>
- 32 Umgerechnet in die entsprechende Wassersäule (meters water equivalent) – <https://wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data/>
- 33 <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/historically-unprecedented-global-glacier-decline-in-the-early-21st-century/2F1E3ACB11A03F9BA83D11439F5D681>
- 34 <https://science.sciencemag.org/content/345/6199/919>
- 35 IPCC 2018, SROCC, Technical Summary, TS.2 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/04_SROCC_TS_FINAL.pdf
- 36 <https://www.climate.gov/media/15200>
- 37 IPCC 2018, SROCC, SPM, A.3.1 und A.3.2 – <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policy-makers/>; <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>
- 38 IPCC 2018, SROCC, SPM, A.3.4 und Kapitel 4.2.2.3 – <https://www.ipcc.ch/srocc/>, <http://sealevel.colorado.edu/faq>
- 39 <https://www.nature.com/articles/s41558-021-00993-z>
- 40 IPCC 2018, SROCC, SPM, A.6.4 und B.5.4 – <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policy-makers/>
- 41 IPCC 2018, SROCC, SPM, A.2.5 – <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policy-makers/>
- 42 IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/01_SROCC_SPM_FINAL.pdf

herausgegeben von:

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst,
Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, Klimafakten.de

- 43 IPCC 2018, SROCC, SPM, A.6.4 und B.5.4 – <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>
- 44 IPCC 2019, SRCL, SPM, A2.2 – https://www.de-ipcc.de/media/content/SRCL-SPM_de_barrierefrei.pdf
- 45 Blöschl et al. 2019: <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1495-6>
- 46 Kossin et al. 2020: <https://www.pnas.org/content/117/22/11975>; <https://www.gfdl.noaa.gov/global-warming-and-hurricanes/>;
IPCC 2019, SROCC, Kap. 6 – https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/10_SROCC_Ch06_FINAL.pdf
- 47 <https://www.nature.com/articles/s41612-021-00202-w>
- 48 Jordis S. Tradowsky, Sjoukje Y. Philip, Frank Kreienkamp, Sarah F. Kew, Philip Lorenz, Julie Arrighi, Thomas Bettmann, Steven Caluwaerts, Steven C. Chan, Lesley De Cruz, Hylke de Vries, Norbert Demuth, Andrew Ferrone, Erich M. Fischer, Hayley J. Fowler, Klaus Goergen, Dorothy Heinrich, Yvonne Henrichs, Frank Kaspar, Geert Lenderink, Enno Nilson, Friederike E. L. Otto, Francesco Ragone, Sonia I. Seneviratne, Roop K. Singh, Amalie Skålevåg, Piet Termonia, Lisa Thalheimer, Maarten van Aalst, Joris Van den Bergh, Hans Van de Vyver, Stéphane Vannitsem, Geert Jan van Oldenborgh, Bert Van Schaeybroeck, Robert Vautard, Demi Vonk and Niko Wanders: Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021, *Climatic Change*, 176(7), 90, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03502-7>
- 49 Kreienkamp et al., 2022, IPCC 2019, SRCL, SPM, A2.8 – https://www.de-ipcc.de/media/content/SRCL-SPM_de_barrierefrei.pdf
- 50 Kaspar, F., Friedrich, K., & Imbery, F.: Observed temperature trends in Germany: Current status and communication tools. *Meteorologische Zeitschrift*, 32 (4), 279–291, 2023. <https://doi.org/10.1127/metz/2023/1150>
- 51 Kaspar, F., Friedrich, K., & Imbery, F.: Observed temperature trends in Germany: Current status and communication tools. *Meteorologische Zeitschrift*, 32 (4), 279–291, 2023. <https://doi.org/10.1127/metz/2023/1150>
- 52 www.dwd.de/zeitreihen
- 53 Kaspar et al. (DWD) 2020: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf
- 54 www.dwd.de/zeitreihen
- 55 <https://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/13757034/2020-03-25-bue-winter/>
- 56 Brasseur/Jacob/Schuck-Zöllner (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Springer-Wissenschaft 2017, S. 138 – <https://www.springer.com/de/book/9783662503966>;
- 57 Becker, P. et al. (DWD) 2016: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160719_entwicklung_starkniederschlag_deutschland.pdf;
Berg et al., 2013: <https://www.nature.com/articles/ngeo1731>; Becker, 2019: <https://www.springerprofessional.de/extremere-niederschlag-im-klimawandel-was-wissen-wir/17465638>
- 58 Lengfeld, K., Winterrath, T., Junghänel, T., Hafer, M., und Becker, A.: Characteristic spatial extent of hourly and daily precipitation events in Germany derived from 16 years of radar data. *Meteorologische Zeitschrift* 28(5), 363–378, <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0964>, 2019. Lengfeld, K., Kirstetter, P.-E., Fowler, H.J., Yu, J., und Becker, A., Flamig, Z., Gourley, J.: Use of radar data for characterizing extreme precipitation at fine scales and short durations, *Env. Res. Letters* 15(8), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab98b4>, 2020.)
- 59 Giorgi et al. 2011: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3979.1>
- 60 Giorgi et al. 2019: <https://doi.org/10.5194/esd-10-73-2019>
- 61 Bryne und O’Gorman, 2016: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0351.1>
- 62 UBA 2019: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf
- 63 Rakovec, O., Samaniego, L., Hari, V., Markonis, Y., Vojtech Moravec, Stephan Thober, Martin Hanel, Rohini Kumar: The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe. *Earth’s Future*, <https://doi.org/10.1029/2021EF002394>
- 64 Hari et al. 2020: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-68872-9>
- 65 <https://www.ufz.de/index.php?de=47252>
- 66 de Brito, M.M., Kuhlicke, C., Marx, A. 2020: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aba4ca>
- 67 https://www.deutschlandfunk.de/binnenschiffahrt-im-klimawandel-wenn-die-elbe-nur-noch.724.de.html?dram:article_id=458866, https://www.helmholtz-klima.de/sites/default/files/medien/dokumente/duerre_factsheet_de.pdf
- 68 https://rp-online.de/politik/deutschland/hitzesommer-2018-senkte-leistung-von-atom-und-kohlekraftwerken_aid-39678285
- 69 https://www.bafg.de/DE/05_Wissen/04_Pub/04_Buecher/niedrigwasser_2018_dokument.pdf?__blob=publicationFile
- 70 L. Samaniego et al, 2018: <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0138-5>, <https://www.ufz.de/index.php?de=42489>
- 71 IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- 72 Brasseur/Jacob/Schuck-Zöllner (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Springer-Wissenschaft 2017, S. 153f. <https://www.springer.com/de/book/9783662503966>
- 73 https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.pdf?__blob=publicationFile&v=15#page=39;
Kaspar et al. 2014: <https://doi.org/10.5194/asr-11-93-2014>
- 74 <https://bfn.buchweltshop.de/nabiv-heft-98-auswirkungen-des-rezenten-klimawandels-auf-die-fauna-in-deutschland.html>
- 75 Brasseur/Jacob/Schuck-Zöllner (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Springer-Wissenschaft 2017, S. 154 – <https://www.springer.com/de/book/9783662503966>
- 76 <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html>
- 77 https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/wbi_doku.html
- 78 UBA 2019: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf
- 79 Hinrichs et al. 2019: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00158/full>; Antworten der Bundesregierung vom 8. Juni bzw. 2. Juli 2020 auf eine Schriftliche Frage der Bundestagsabgeordneten Steffi Lemke – https://www.steffi-lemke.de/uploads/2020/07/Schriftliche_Frage_Temperaturanstieg.pdf
- 80 <https://meeresspiegel-monitor.de/cuxhaven/trend/index.php.de>

- 81 www.sturmflut-monitor.de
- 82 <https://meeresspiegel-monitor.de/cuxhaven/trend/index.php.de>
- 83 IPCC 2013, AR5, WG1, SPM E.1 - https://www.de-ipcc.de/media/content/AR5-WGI_SPM.pdf
- 84 WMO 2022: https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/WMO_GADCU_2022-2026.pdf
- IPCC 2018, SR1.5, SPM, A.1 - https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/SR1.5-SPM_de_barrierefrei-2.pdf
- 85 <https://climateactiontracker.org/>
- 86 Tollefson 2020: <https://www.nature.com/articles/d41586-020-01497-0>;
<https://www.newscientist.com/article/2245330-co2-levelshit-record-high-despite-emissions-dip-from-coronavirus/>
<https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-6-2.html>
- 87 IPCC 2018, SR1.5, SPM, A.2 - https://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf
- 88 IPCC 2018, SR1.5, SPM, C.1f. - https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/SR1.5-SPM_de_barrierefrei-2.pdf
- 89 https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- 90 <https://phys.org/news/2019-06-eu-countries-phase-coal.pdf>
- 91 Lenton et al. 2019: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03595-0>
- 92 Schleussner et al. 2016: <https://esd.copernicus.org/articles/7/327/2016/esd-7-327-2016.pdf>
- 94 Screen 2018: <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0137-6>
- 95 IPCC, AR6, 2021-2022, WG 3, SPM, Tabelle SMP.2 -https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf,
Rasmussen et al. 2018: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaac87>;
vgl. generell zum Thema auch IPCC 2018, SR1.5 - <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- 96 <https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/>
- 97 <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- 98 <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>

Die Abbildung auf dem Titelblatt zeigt die sogenannten „Warming Stripes“ für den Zeitraum 1850 bis 2022 – jeder Streifen steht für ein Jahr, die Farbe richtet sich nach der Mitteltemperatur in Deutschland des jeweiligen Jahres, dabei steht Blau für kühl und Rot für warm.

Grafik: DWD/ Idee: Ed Hawkins/www.showyourstripes.info