

1 Dringlichst gesucht – Wege aus der Klimakrise

> Seit Jahrzehnten weiß man, dass sich durch den Ausstoß von Treibhausgasen die Erdatmosphäre erwärmt und sich das Klima verändert. Ein Umdenken aber blieb bisher aus, wertvolle Zeit verstrich ungenutzt. Erst jetzt, wo die dramatischen Folgen immer augenfälliger werden, beginnen Verantwortliche ernsthaft nach Lösungen zu suchen. Dabei müssen sie feststellen, dass Treibhausgasreduktionen allein nicht ausreichen werden, den Klimawandel auf ein erträgliches Maß zu begrenzen.



Alarmstufe Rot für Mensch und Natur

> Der Klimawandel ist angekommen im Alltag der Menschen. Mindestens die Hälfte der Weltbevölkerung leidet inzwischen unmittelbar unter den Folgen der globalen Erwärmung. Brunnen versiegen, Hitze wird unerträglich, Stürme und Fluten reißen Hab und Gut davon. Zugleich versagen die ohnehin schon geschundenen Ökosysteme mehr und mehr ihren Dienst. Klima und Natur – so viel ist klar – machen keine Kompromisse. Für die Menschheit geht es daher um alles, denn der selbst angestoßene Wandel entpuppt sich als lebensgefährlicher Gefahrenmultiplikator.

Unsere Zukunft steht auf dem Spiel

Die Menschheit weiß seit Jahrzehnten, dass sie das Klima der Erde durch den Ausstoß von Treibhausgasen erwärmt. Welches Ausmaß die weltweiten Klimaveränderungen jedoch bereits angenommen haben und in welcher Notlage sich das Leben auf dem Planeten Erde schon heute befindet, wurde selten mit solcher Dringlichkeit kommuniziert wie im sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC).

Im Auftrag des Weltklimarates, wie der IPCC auch im Deutschen genannt wird, bewerten mehr als 750 Klimawissenschaftlerinnen und Klimawissenschaftler aus

aller Welt in regelmäßigen Abständen den aktuellen Stand des Wissens zu den Veränderungen des Erdklimas. Sie analysieren Forschungsergebnisse zu den Ursachen und Folgen des Klimawandels; sie tragen zusammen, in welchem Umfang Natur und Menschheit in der Lage sind, sich an das neue Klima anzupassen; und sie beschreiben, durch welche Maßnahmen es gelingen kann, die Klimagefahren zu verringern und die globale Erwärmung zu begrenzen.

Die Kernaussagen der drei Teilbände des sechsten Weltklimaberichtes machen eines sehr deutlich: dass die Menschheit mit ihren anhaltend hohen Treibhausgasemissionen eine lebenswerte Zukunft für aktuelle und kommende Generationen aufs Spiel setzt.



1.1 > Qualm steigt aus den Schornsteinen eines chinesischen Stahlwerkes in der Inneren Mongolei. Währenddessen schmelzen Arbeiter in einem Camp davor illegal Erz ein. China emittiert im weltweiten Vergleich das meiste Kohlendioxid (rund 30 Prozent der globalen Emissionen 2022), auch deshalb, weil Kohle immer noch die Hauptenergiequelle des Landes ist.

Eine rasante Erwärmung und ihre Folgen für das Klima der Erde

Nach Angaben des Weltklimarates lag die globale Oberflächentemperatur im Zeitraum von 2010 bis 2022 rund 1,15 Grad Celsius über dem Vergleichswert aus dem Zeitraum 1850 bis 1900. Die Erwärmung über Land fiel dabei deutlich höher aus als über dem Meer. Die Temperaturen über den Kontinenten stiegen im Mittel um 1,65 Grad Celsius, während sich die Luftmassen über dem Meer um 0,93 Grad Celsius erwärmten. Gut informierte Leserinnen und Leser mögen angesichts dieser Zahlen stutzen, weil andere Institutionen und bekannte Nachrichtenportale seit dem Jahr 2020 von einer globalen Erwärmung von 1,2 Grad Celsius sprechen. Vor diesem Hintergrund stellt sich deshalb die Frage: Arbeitet der Weltklimarat mit veralteten Daten? Mitnichten.

Globale Klimaberichte wie jene des Weltklimarates oder aber auch die regelmäßig erscheinenden Analysen der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) beziehen sich auf langfristige Veränderungen der Klimaparameter. In Bezug auf die globale Oberflächentemperatur analysieren sie deshalb nicht nur die Temperaturwerte eines spezifischen Jahres, weil diese durch kurzfristige natürliche Temperaturschwankungen beeinflusst sein könnten. Stattdessen nutzen IPCC-Autorinnen und -Autoren Messdaten aus den zurückliegenden 20 Jahren als Datenbasis. Auf diese Weise sind sie in der Lage, den tatsächlichen langfristigen Trend zu detektieren.

Und die Erwärmung der Erde beschleunigt sich: In den vergangenen 50 Jahren (1970 bis 2020) ist die globale Oberflächentemperatur schneller gestiegen als in jeder anderen 50-Jahres-Periode innerhalb der zurückliegenden 2000 Jahre. Betrachtet man die vergangenen vier Jahrzehnte im Detail (1980 bis 2020), dann war jede der vier Dekaden wärmer als die jeweils vorhergehende.

Diese Entwicklung führt dazu, dass viele Komponenten des Klimasystems der Erde Veränderungen in einer Geschwindigkeit erfahren, wie sie unser Planet seit vielen Jahrhunderten oder Jahrtausenden nicht erlebt hat. Das Ausmaß dieser Veränderungen ist jedoch nicht überall gleich. Einige Regionen sind stärker betroffen als andere. Hinzu kommt: Jedes weitere Zehntelgrad Erwärmung

wird dazu führen, dass sich der angestoßene Wandel verstärkt. Das heißt, das Ausmaß und die extreme Geschwindigkeit der Veränderungen sowie die damit verbundenen Risiken werden mit jedem weiteren Temperaturanstieg zunehmen, und sei er noch so klein. Dazu gehören insbesondere die Erwärmung, Versauerung und zunehmenden Sauerstoffverluste der Meere, die Zunahme extremer Hitzeereignisse über Land und in den Ozeanen, das Schmelzen der Eismassen, steigende Meeresspiegel sowie Veränderungen im Wasserkreislauf der Erde.

Eine zunehmende Erwärmung, Versauerung und Sauerstoffarmut der Meere und Ozeane

AKTUELLER STAND: Die Meere und Ozeane sind die größte Wärmebatterie unseres Planeten. Diese Batterie wird durch den Klimawandel und die damit verbundene Erwärmung der Atmosphäre ununterbrochen aufgeladen. Meere und Ozeane haben in den zurückliegenden 60 Jahren rund 90 Prozent der durch den Treibhauseffekt in der Erdatmosphäre gefangenen Wärme aufgenommen und in ihren Tiefen gespeichert. Infolgedessen hat sich der Wärmegehalt des Meeres vervielfacht, und die Wassertemperaturen steigen schneller als zu jedem anderen Zeitpunkt seit der letzten Eiszeit. Betrachtet man nur die Meeresoberflächentemperatur, so ist diese im Zeitraum von 1850 bis 1900 bis zum Jahr 2022 um durchschnittlich 0,93 Grad Celsius gestiegen.

Forschende bezeichnen den Anstieg der Meerestemperaturen als deutlichsten Indikator des menschengemachten Klimawandels – zum einen, weil der Weltozean den größten Teil der zusätzlichen Wärme aufnimmt, zum anderen aber auch, weil seine Oberflächentemperaturen geringeren Schwankungen von Jahr zu Jahr unterworfen sind als zum Beispiel die Atmosphäre. Der Erwärmungstrend ist somit leichter auszumachen.

Im Zuge der Meerese Erwärmung hat die Schichtung der Wassermassen in den oberen 200 Metern der Wassersäule zugenommen. Gleichzeitig hat die zunehmende Verdunstung von Wasser an der Meeresoberfläche dazu geführt, dass das ohnehin schon salzigere Oberflächenwasser in Verdunstungsregionen noch salziger geworden ist. In Meeresgebieten mit vielen Niederschlägen oder aber starkem Schmelzwasserzufluss haben die Süßwassereinträge hingegen zugenommen. Das heißt, hier ist der

ohnehin schon niedrige Salzgehalt des Oberflächenwassers weiter gesunken.

Beide Entwicklungen, die zunehmende Schichtung der Wassermassen und die Veränderungen des Salzgehaltes, führen seit den 1950er-Jahren zu einer abnehmenden dichtebedingten Durchmischung des Oberflächenwassers mit darunterliegenden Wassermassen und befeuern so die zunehmenden Sauerstoffverluste des Meeres. Die Sauerstoffarmut zeigt sich insbesondere in sogenannten Sauerstoffminimumzonen, die sich im Westpazifik, im Indischen Ozean sowie vor der Westküste des südlichen Afrikas unterhalb der sogenannten Deckschicht bilden, das heißt in Wassertiefen von mehr als 100 bis 200 Metern. In diesen Zonen enthält das Wasser weniger als 70 Mikromol Sauerstoff pro Kilogramm Wasser, sodass sauerstoffhungrige Meeresbewohner wie Haie und Thunfische dort keine Überlebenschance haben.

Die Meere und Ozeane nehmen jedoch nicht nur Wärme auf, sondern auch rund ein Viertel der vom Menschen freigesetzten Kohlendioxidmenge. Anders als Sauerstoff aber löst sich Kohlendioxid nicht einfach nur im Wasser, sondern durchläuft dort eine chemische Kettenreaktion. Als Ergebnis dieser Reaktion steigt der Säuregehalt des Wassers. Das heißt, das Meer versauert, wodurch sich die Lebensbedingungen für viele Meeresorganismen grundlegend verschlechtern. Expertinnen und Experten sprechen in diesem Fall von einem sinkenden pH-Wert – das Maß für den Säuregehalt des Meeres. Nach Angaben des Weltklimarates ist der pH-Wert des Oberflächenwassers in den zurückliegenden 40 Jahren in nahezu allen Meeresgebieten gesunken – und zwar in einem solchen Maß, dass die Versauerung heutzutage so hoch ist wie zu keinem anderen Zeitpunkt in den zurückliegenden 26 000 Jahren. Auch das Tempo, mit dem die Meere derzeit versauern, ist rekordverdächtig. Erschwerend kommt hinzu, dass die Versauerung nicht mehr nur allein das Oberflächenwasser betrifft, sondern seit etwa 30 Jahren auch im Ozeaninnern immer häufiger nachgewiesen werden kann.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Erwärmung der Meere und Ozeane wird sich fortsetzen, selbst wenn es der Menschheit gelingen sollte, die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Diese Tatsache erklärt sich durch die Trägheit des Systems Meer. Das heißt, wichtige Prozesse laufen so langsam ab, dass die Auswirkungen ein-

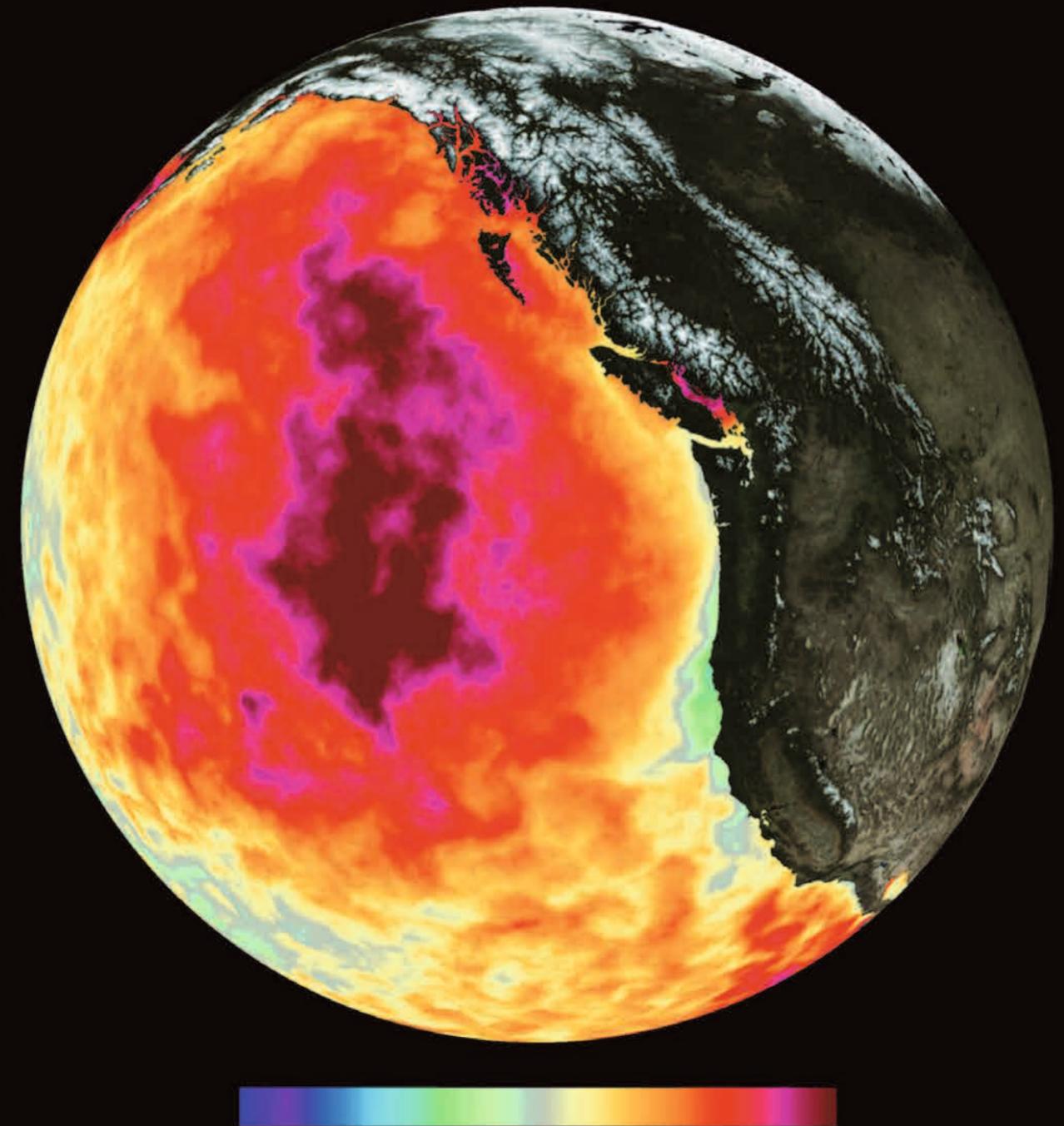
mal angestoßener Veränderungen über Jahrhunderte, wenn nicht sogar über Jahrtausende zu spüren sind und eine Umkehr ebenso viel Zeit braucht. Dennoch hat die Menschheit es in der Hand: Wie stark sich die Ozeane ab dem Jahr 2050 erwärmen werden, hängt einzig und allein davon ab, ob wir den Klimawandel bremsen können. Die künftige Temperatur des Wassers entscheidet auch darüber, wie viel Sauerstoff die Ozeane noch enthalten werden. Je wärmer das Meer, desto weniger Sauerstoff kann sich darin lösen.

Die Zunahme extrem warmer Temperaturen in allen Teilen der Welt

AKTUELLER STAND: Meteorologinnen und Meteorologen verzeichnen seit den 1950er-Jahren eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität extrem warmer Tage sowie eine Zunahme der Intensität und Dauer von Hitzewellen über Land. Neu ist, dass diese Wetterextreme mittlerweile Rekordtemperaturen erreichen, die ohne den menschengemachten Klimawandel unmöglich gewesen wären. Ein Beispiel stellt die extreme Hitzewelle dar, die Ende Juni 2021 den Nordwesten der USA und Kanada heimsuchte. Örtlich stiegen die Temperaturen damals auf bis zu 49,6 Grad Celsius und übertrafen alte Hitzerekorde an einigen Wetterstationen um bis zu 4,6 Grad Celsius. Forschung dazu belegt nun: Ohne den menschengemachten Klimawandel wäre diese Hitzewelle etwa zwei Grad Celsius niedriger ausgefallen. In einer Welt mit einer globalen Erwärmung von zwei Grad Celsius dagegen hätten die Temperaturhöchstwerte dieser Hitzewelle die 50-Grad-Marke überschritten. Zugleich steigt mit der globalen Erwärmung die Gefahr einer solchen Hitzewelle im Westen Nordamerikas. Lag die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens im Juni 2021 noch bei einem Ereignis alle 1000 Jahre, würde sich das Extremereignis in einer Welt mit einer globalen Erwärmung von zwei Grad Celsius bereits alle fünf bis zehn Jahre wiederholen.

Die Häufigkeit, Intensität und Dauer mariner Hitzewellen nehmen ebenfalls zu. Meereshitzewellen treten mittlerweile doppelt so häufig auf wie noch in den 1980er-Jahren und richten große Schäden in den Lebensgemeinschaften des Meeres an. Und auch hier können Forschende mittlerweile den Einfluss des Menschen klar identifizieren. Ohne Klimawandel hätte es höchstwah-

1.2 > Dunkelrot markiert sind jene Meeresregionen des Nordpazifiks, in denen die Wassertemperatur im Mai 2015 bis zu drei Grad Celsius wärmer war als normal. Die ursächliche Meereshitzewelle hielt mehr als 250 Tage an, kostete Abertausenden Fischen, Seevögeln und Meeressäugern das Leben und ist bis heute unter der Bezeichnung „The Blob“ bekannt.



1.3 > Von Hitze geschwächte Menschen in den klimatisierten Räumen eines Messezentrums in Portland, US-Bundesstaat Oregon. Die Veranstaltungsräume wurden während einer extremen Hitzewelle im Frühsommer 2021 geöffnet, damit die Menschen sich abkühlen und ausruhen können.



scheinlich auch jene Meereshitzewelle nicht gegeben, die in den Jahren 2013 bis 2015 das Leben im Nordostpazifik auf den Kopf stellte und unter dem Namen „The Blob“ in die Geschichtsschreibung einging. Damals verhungerten unter anderem eine Million Trottellummen (*Uria aalge*), weil die außergewöhnlich warmen Wassertemperaturen dazu geführt hatten, dass ihre Beutetiere in viel kleinerer Zahl vorkamen als unter normalen Bedingungen. Die Sterberate der Trottellummen stieg deshalb um das 1000-Fache. BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Intensität und Dauer der Hitzewellen an Land werden weiter zunehmen, selbst wenn es der Menschheit gelingen sollte, die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Meereshitzewellen werden ebenfalls häufiger auftreten. Erwärmt sich die Welt um durchschnittlich 1,8 Grad Celsius bis zum Jahr 2100, wird sich die Zahl der Meereshitzewellen in den kommenden 60 bis 80 Jahren verdoppeln bis vervielfachen. Steigt die globale Mitteltemperatur sogar um etwa 4,4 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit, werden Meereshitzewellen in den letzten zwei Jahrzehnten dieses Jahrhunderts drei- bis 15-mal so häufig auftreten wie im Zeitraum 1995 bis 2014, wobei die größten Veränderungen für die tropischen Gewässer und den Arktischen Ozean vorausgesagt werden.

Ein weltweiter Rückzug der Berggletscher

AKTUELLER STAND: So wenig Gletschereis wie heute gab es auf der Erde in den zurückliegenden 2000 Jahren nicht. Weltweit schrumpfen die Berggletscher seit den 1990er-Jahren in zunehmendem Tempo, weil sich die Luft auch in den Höhenlagen erwärmt. Der Temperaturanstieg hat zur Folge, dass weniger Schnee auf der Gletscheroberfläche den Sommer übersteht und in den Folgejahren in Eis umgewandelt werden kann. Gleichzeitig schmelzen die Berggletscher zunehmend an ihrer Oberfläche. Ihr Schmelzwasser hat in den zurückliegenden 120 Jahren im Mittel rund 6,72 Zentimeter zum Anstieg des globalen Meeresspiegels beigetragen.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Für die kommenden Jahrzehnte ist mit einer weiteren Abnahme der Schneebedeckung und Gletschereismassen in den Gebirgen der Erde zu rechnen. Außerdem wird der dauergefrorene Boden (Permafrost) in vielen Hochgebirgsregionen auftauen. Da es zeitgleich mehr Starkregen anstelle von anhaltendem Schneefall geben wird, prognostizieren die Forschenden für viele Bergregionen eine zunehmende Gefahr von Überflutungen und Erdbeben. Hinzu kommt: Mit dem Gletschereis schwinden wiederum wichtige Wasserreserven für Millionen Menschen entlang der

Flüsse, welche durch das Schmelzwasser der Berggletscher gespeist werden.

Ein deutlicher Rückgang des arktischen Meereises

AKTUELLER STAND: Die Arktis hat sich in den zurückliegenden Jahren mehr als doppelt so schnell erwärmt wie die gesamte Welt im Durchschnitt. Infolgedessen ist das Sommerminimum des arktischen Meereises – so nennt man die geringste Ausdehnung des Eises zum Ende der warmen Jahreszeit – mittlerweile rund 40 Prozent kleiner als noch zu Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979. Außerdem ist das verbleibende Eis deutlich dünner als früher, treibt deshalb schneller über den Arktischen Ozean und wird auch nur noch selten mehr als zwei Jahre alt, bevor es schmilzt.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Sommerschmelze des arktischen Meereises wird sich beschleunigen, gleichzeitig wird im Winter weniger Eis gefrieren. Beide Entwicklungen werden dazu führen, dass der Arktische Ozean bis zum Jahr 2050 mindestens einmal eisfrei sein wird zum Ende des Sommers – abgesehen von kleinen Resteisflächen in geschützten Buchten oder Fjorden, deren Gesamtfläche jedoch weniger als eine Million Quadratkilometer betragen wird.

Zunehmende Masseverluste der Eisschilde in Grönland und der Antarktis

AKTUELLER STAND: Der Eispanzer Grönlands hat im Zeitraum 1992 bis 2020 schätzungsweise 4890 Milliarden Tonnen Eis eingebüßt und mit deren Schmelzwasser 1,35 Zentimeter zum globalen Meeresspiegelanstieg beigetragen. Der Antarktische Eisschild hat im selben Zeitraum 2670 Milliarden Tonnen Eis verloren, wobei er die größten Verluste in seinem westlichen Teil, dem Westantarktischen Eisschild, verzeichnete. Sowohl dort als auch an der Antarktischen Halbinsel hat das Fließtempo der Gletscher in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten deutlich zugenommen. Das heißt, die Gletscher transportieren heutzutage deutlich mehr Eis von Land ins Meer als noch im Jahr 2000.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Beide großen Eisschilde der Welt werden mit zunehmender Erwärmung mehr Eis verlieren und verstärkt zum Anstieg des globalen Meeresspiegels beitragen. Sollte sich die Welt um mehr als zwei

Grad Celsius erwärmen, wird der Eispanzer der Westantarktis sehr wahrscheinlich zerfallen, und seine Eismassen werden in das Meer abrutschen. Wann und in welchem Tempo und Umfang ein solcher Zerfall erfolgen könnte, lässt sich bislang allerdings nur mit einer sehr geringen Gewissheit vorhersagen.

Ein beschleunigter Anstieg der Meeresspiegel

AKTUELLER STAND: Der mittlere globale Meeresspiegel ist im Zeitraum 1901 bis 2018 um 20 Zentimeter gestiegen, wobei seine Anstiegsrate seit den 1960er-Jahren kontinuierlich wächst. Das heißt, der Meeresspiegel steigt immer schneller. Im Zeitraum von 2006 bis 2018 betrug der globale Anstieg bereits 3,7 Millimeter pro Jahr. Betrachtet man den Zeitraum von 2013 bis 2022 waren es nach Angaben der WMO bereits 4,62 Millimeter. So schnell sind die Wasserstände in den zurückliegenden 3000 Jahren nicht angestiegen. Lokal und regional aber können die Pegel auch noch deutlich stärker steigen – etwa, weil sich das Land entlang der Küstenlinie gleichzeitig absenkt oder Wind und Meeresströmungen das Wasser vor der Küste auftürmen.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Entwicklung des globalen Meeresspiegels wird durch zwei Faktoren bestimmt – zum einen durch die Temperatur des Meerwassers (je wärmer das Wasser, desto stärker dehnt es sich aus und nimmt demzufolge mehr Raum ein); zum anderen durch Veränderungen der an Land gespeicherten Wassermenge (Eismassen, Grundwasser, Flüsse, Seen). Gelangt mehr Wasser vom Land in den Weltozean, steigen die Wasserpegel. An jedem lokalen Küstenabschnitt stellt sich zudem die Frage, ob das Küstengebiet selbst irgendwelchen Höhenveränderungen unterworfen ist – etwa, weil viel Grundwasser abgepumpt wird und der Untergrund deshalb absinkt (Subsidenz) oder geologische Prozesse zu einer Anhebung oder Absenkung der Landfläche führen. Veränderungen des lokalen Meeresspiegels können auch deshalb deutlich stärker oder aber schwächer ausfallen als der globale Trend.

Der Weltklimarat prognostiziert einen weiteren Anstieg des globalen Meeresspiegels, selbst wenn es der Menschheit gelingen sollte, ihre Treibhausgasemissionen innerhalb kurzer Zeit auf null zu reduzieren. Die Spanne der möglichen Anstiegsszenarien reicht von zusätzlichen



1.4 > Ein Eisberg, abgebrochen vom Grönländischen Eisschild. Seit dem Jahr 1996 verliert der Eispanzer Grönlands mehr Eis durch Oberflächenschmelze und das Kalben von Eisbergen, als sich durch die Verdichtung neuen Schnees bilden kann.

18 bis 23 Zentimetern bis zum Jahr 2050. Für das Ende des Jahrhunderts wird ein Anstieg von 38 bis 77 Zentimetern erwartet.

Veränderungen im Wasserkreislauf

AKTUELLER STAND: Die globale Erwärmung hat zur Folge, dass weltweit mehr Wasser verdunstet, über dem Meer ebenso wie über dem Land. Dadurch steigt zum einen die Wasserdampfmenge in der Atmosphäre und damit die Wahrscheinlichkeit, dass sich Regentropfen bilden. Zum anderen verliert das Erdreich im Zuge der Verdunstung wichtige Bodenfeuchtigkeit, die eigentlich für das Wachstum von Pflanzen benötigt wird. Beide physikalischen Prozesse verändern das Wetter und Klima nachhaltig: Schon seit den 1950er-Jahren lässt sich eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen beobachten – zumindest in jenen Regionen der Welt, in denen es eine kontinuierliche Wetteraufzeichnung gibt. Gleichzeitig steigt im Zuge des Klimawandels in einigen Regionen die Dürrefahr, weil Niederschläge vor allem in den trockensten Monaten des Jahres ausbleiben oder aber zu anderen Jahreszeiten fallen – und dann in so großen Mengen, dass das Wasser oberflächlich abläuft und nicht im Boden versickern kann. Ein großes Problem stellt zudem die Abnahme der Schneedecke dar. Weil es seit den 1950er-Jahren im Winter seltener schneit, bildet sich vielerorts keine Schneedecke mehr. Deren Schmelzwasser aber versorgte im Frühjahr Mensch und Natur und fehlt mittlerweile flächendeckend, vor allem in Bergregionen sowie in der Tundra.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen werden vielerorts weiter zunehmen, wodurch das Hochwasser- und Überflutungsrisiko steigt. Zunehmen werden zudem die Dürrefahr und die Zahl der Regionen, die künftig häufiger und länger anhaltend von Dürre betroffen sein werden. Die Schneedecke wird vor allem auf der Nordhalbkugel weiter schrumpfen, mit der Folge, dass Flüsse und Bäche temperaturbedingt zu einem früheren Zeitpunkt Schmelzwasser führen werden und diese Wassermengen auch geringer ausfallen können.

Mehr Taifune und Hurrikane

AKTUELLER STAND: In den zurückliegenden vier Jahrzehnten hat der Anteil tropischer Wirbelstürme der Kate-

gorie drei bis fünf auf der Saffir-Simpson-Hurrikan-Windskala (Windgeschwindigkeiten von mehr als 178 Stundenkilometern) zugenommen, und es kommt häufiger vor, dass sich ein eher schwacher Sturm innerhalb kurzer Zeit zu einem echten Hurrikan entwickelt. Über dem Westatlantik ziehen tropische Wirbelstürme mittlerweile langsamer vom offenen Meer Richtung Land. Das heißt, die Wirbelstürme verweilen länger an ein und demselben Ort und richten in der Regel auch größere Schäden an. Über dem Nordpazifik haben die außertropischen Wirbelstürme ihre Zugbahnen nordwärts verlagert und treffen nun anderswo auf Land als noch vor 40 Jahren.

Der Klimawandel in Zahlen:

Die sieben Klima-Indikatoren der WMO

Das Ausmaß des Klimawandels wird in den Medien und in der Politik in erster Linie über den Anstieg der mittleren globalen Oberflächentemperatur kommuniziert. Dabei reicht diese eine Kenngröße allein gar nicht aus, um den Zustand und mögliche Veränderungen des Erdklimas umfassend zu beschreiben. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) hat deshalb im Jahr 2018 sieben Schlüsselindikatoren ausgewählt, anhand derer sie fortan die globalen Veränderungen des Klimas der breiten Öffentlichkeit und Entscheidungstragenden vermittelt. Dazu gehören:

- (1) die mittlere globale Oberflächentemperatur,
- (2) die zusätzlich vom Ozean aufgenommene Wärmemenge,
- (3) die mittlere Veränderung des globalen Meeresspiegels,
- (4) die Ausdehnung des Meereises in der Arktis und der Antarktis,
- (5) die Eismasseveränderungen des Grönländischen und des Antarktischen Eisschildes,
- (6) der mittlere globale pH-Wert des Meerwassers (Ozeanversauerung),
- (7) die mittlere Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre.

Jeder dieser Indikatoren wird mindestens einmal pro Jahr wissenschaftlich erfasst und seine Messdaten mit weltweit einheitlichen Methoden erhoben. Gemeinsam spiegeln sie Veränderungen in der Atmosphäre sowie im Energiehaushalt der Erde wider und geben eine erste Vorstellung vom aktuellen Zustand des Erdklimas. Außerdem lassen sich alle sieben Indikatoren mithilfe einfacher Zahlenwerte beschreiben. Die aktuellsten Werte der sieben Indikatoren veröffentlicht die WMO in ihrem jährlich erscheinenden Bericht zum Zustand des Klimas. Im Zeitraum 2021/2022 erreichten vier der sieben Indikatoren neue Höchstwerte. Das heißt, nie zuvor seit Beginn der Wetter- und Klimaaufzeichnungen waren die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, der Meeresspiegelanstieg, die Ozeanversauerung und der Wärmegehalt des Ozeans so hoch wie in den Jahren 2021 und 2022.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Forschende gehen davon aus, dass sich die Zahl der Wirbelstürme insgesamt kaum verändern wird. Allerdings wird in den tropischen Regionen der Anteil besonders starker und damit zerstörerischer Stürme weiter zunehmen.

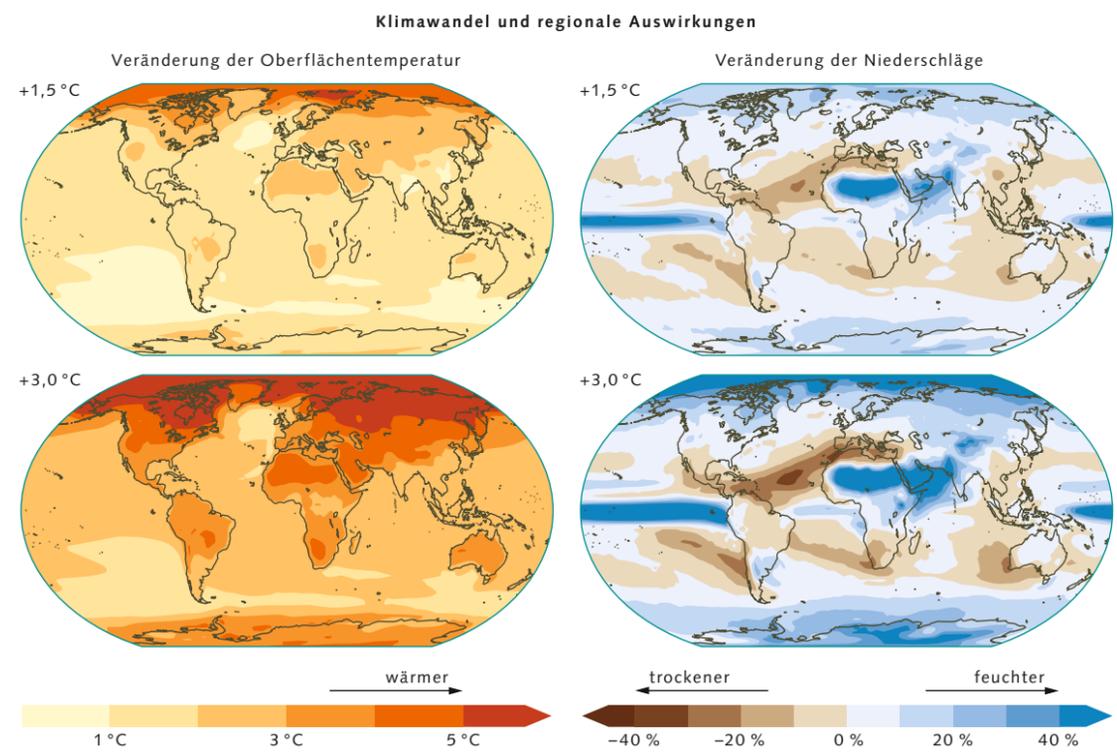
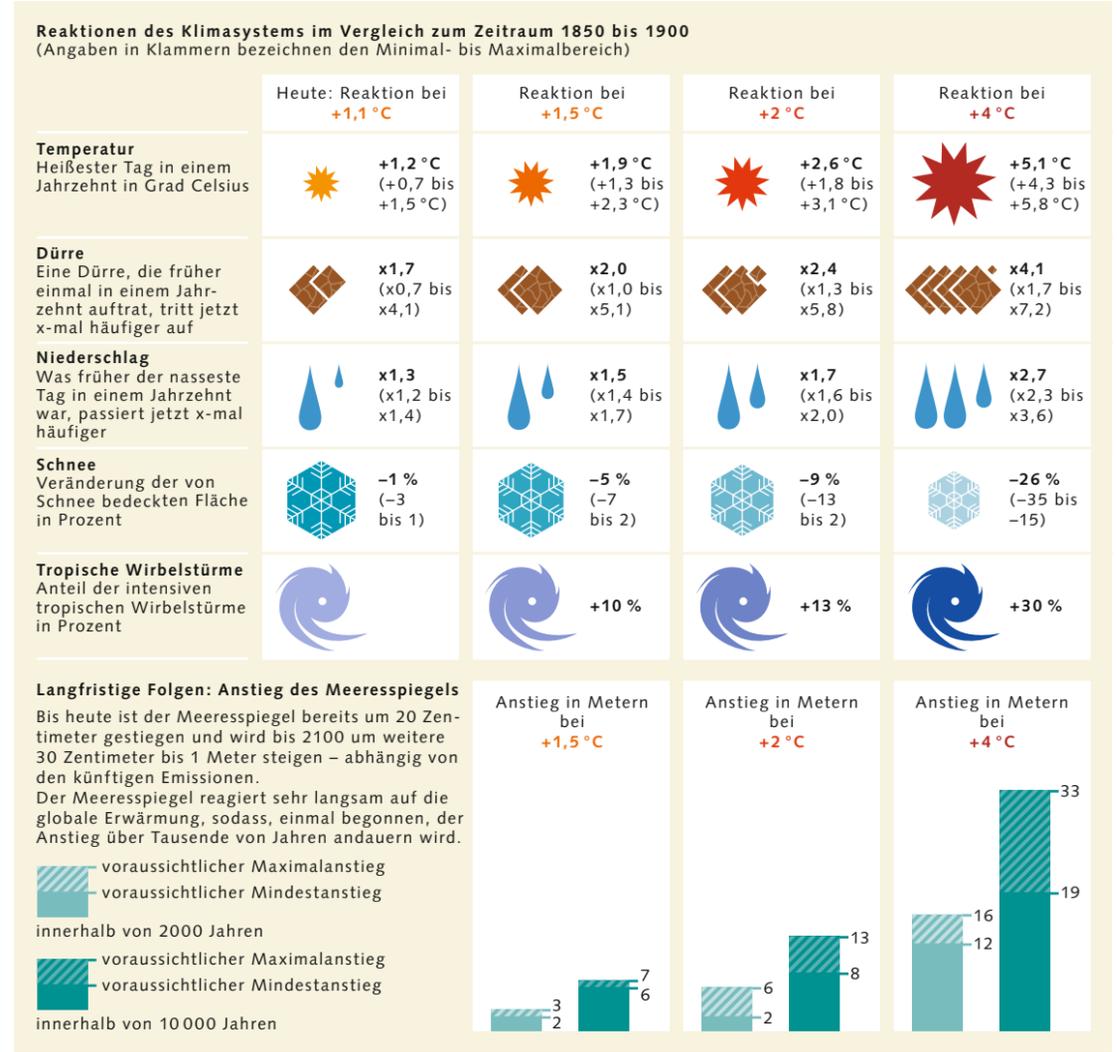
Wenn Extreme aufeinandertreffen

Im Zuge des Klimawandels wird die Welt nicht nur wärmer, Mensch und Natur sind auch immer häufiger Klima- und Wetterextremen ausgesetzt. Dazu gehören Hitzewellen, Starkregen, schwere Stürme, Dürren, Überflutungen

und Sturmfluten, die aufgrund der steigenden Meeresspiegel weite Küstengebiete überspülen. Immer häufiger kommt es dabei vor, dass zwei oder drei Wetterextreme gleichzeitig auftreten. In den zurückliegenden 100 Jahren wurden zum Beispiel mehr und mehr Hitzewellen beobachtet, die in Regionen auftraten, in denen zur gleichen Zeit bereits Dürre herrschte.

Überlagern sich solche Extreme, verstärken sich ihre Klimafolgen für Mensch und Natur. Das heißt, Dürre und Hitze richten gemeinsam viel größere Schäden an, als jedes Extremereignis für sich allein verursacht hätte. Das gilt nicht nur für die Kombination aus Hitze und Dürre,

1.5 > Viele Komponenten des Klimasystems reagieren schnell auf die globale Erwärmung – und je höher diese ausfällt, desto größer sind die Veränderungen. Andere Klimafolgen hingegen nehmen erst langsam Fahrt auf. Einmal in Gang gesetzt, lassen sie sich dann aber auch nicht mehr kurzfristig stoppen. Das prominenteste Beispiel: der Anstieg des Meeresspiegels.



1.6 > Der Klimawandel ruft nicht in allen Erdteilen die gleichen Veränderungen hervor. Stattdessen gibt es regionale Unterschiede, die mit zunehmender globaler Erwärmung immer deutlicher zum Vorschein treten. In den hohen Breiten, den Tropen und den Monsungebieten wird es beispielsweise mehr regnen, während die Subtropen weniger Niederschläge bekommen werden.

sondern auch für den Fall, dass Küstenregionen von schweren Stürmen heimgesucht werden, die sowohl eine Sturmflut (Meereshochwasser) als auch Starkregen (Überflutung an Land, Flusshochwasser) mit sich bringen. Gemeinsam führen Sturm, Sturmflut und Starkregen zu viel weiträumigeren Überflutungen als jedes Wetterextrem für sich allein genommen.

Die Gefahr, dass Extremereignisse gleichzeitig auftreten und sich gegenseitig in ihren Auswirkungen verstärken, steigt im Zuge des Klimawandels. Besonders gefährdet sind dabei flache Küstenregionen, die regelmäßig von Wirbelstürmen heimgesucht werden.

Die Folgen: Weitreichende Schäden für Mensch und Natur

Die physikalischen Klimaparameter bestimmen den großen Rahmen, innerhalb dessen Leben auf der Erde existieren kann. Verändern sich diese Parameter, wandeln sich nicht nur die Existenzbedingungen für Mensch und Natur, sondern auch für die vom Menschen erbaute Umwelt.

Schließlich halten auch Gebäude, Straßen, Stromnetze, Brücken und andere wichtige Infrastrukturen nur ganz bestimmten Umweltbedingungen stand. Die globale Erwärmung von 1,5 Grad Celsius hat bereits zu weitreichenden Schäden und Verlusten für Mensch und Natur geführt und jedes weitere Zehntelgrad Erwärmung wird das Schadensrisiko weiter erhöhen.

Die Aussagen des Weltklimarates zu den beobachteten und künftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die verschiedenen Formen des Lebens auf der Erde lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Eine Neuorganisation natürlicher Lebensgemeinschaften

Der Klimawandel führt zu drastischen und stetig zunehmenden Veränderungen in der Natur. Diese beeinflussen die Artenzusammensetzung der natürlichen Lebensgemeinschaften an Land, in Seen und Flüssen sowie im Meer und schwächen deren Funktions- und Widerstandsfähigkeit. Problematisch sind dabei sowohl langsam voranschreitende Veränderungen (Meeresspiegel, Ozeanversau-

erung) als auch die zunehmende Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen.

Steigende Temperaturen sowie Wetterextreme wie Dürren, Hitzewellen, Stürme, Starkregen und Überflutungen schaffen in allen Regionen der Welt klimatische Bedingungen, wie Tier- und Pflanzenarten sie seit Jahrtausenden noch nicht erlebt haben. Oft übersteigen die gemessenen Rekordtemperaturen schon heute die Belastungsgrenzen der Lebewesen. Hinzu kommt, dass die Wetterextreme mittlerweile so häufig auftreten, dass die Ökosysteme weniger oder gar keine Zeit mehr haben, sich von einem Hitzeschock zu erholen, bevor bereits der nächste folgt.

Tropische Korallenriffe beispielsweise benötigen mindestens zehn Jahre, um eine hitzebedingte Korallenbleiche zu überwinden. Betrachtet man jedoch das australische Great Barrier Reef, so hat dieses seit dem Jahr 2000 insgesamt sechs große Korallenbleichen erlebt, allein vier davon in den Jahren 2016 bis 2022. Bemerkenswert ist dabei, dass die Korallenbleiche im australischen Sommer 2021/22 die erste Bleiche unter La-Niña-Bedingungen war. Unter

diesen Umständen sind die Wassertemperaturen vor der Ostküste Australiens eigentlich kühler als normal. Dennoch zeigten 91 Prozent der Korallen im Great Barrier Reef Anzeichen großen Hitzestresses.

Weltweit sind seit dem Jahr 2009 rund 14 Prozent der Korallenriffe abgestorben. Das entspricht einer Rifffläche von 11 700 Quadratkilometern. Meereshitzewellen waren dabei die Hauptursache. Massensterben dokumentiert die Wissenschaft allerdings auch bei Bäumen, beispielsweise in borealen Wäldern und Mischwäldern im westlichen Nordamerika. Dürre- und hitzegeplagt gehen sie an Krankheiten oder Schädlingen zugrunde, fallen Waldbränden zum Opfer oder aber vertrocknen.

Neue Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels sowie ein besseres Verständnis der natürlichen Prozesse lassen den Weltklimarat außerdem zu dem Schluss kommen, dass der Umfang und die Größenordnung der Klimafolgen für die Natur viel größer sind, als man in der Vergangenheit angenommen hat. Die meisten klimabedingten Veränderungen, die wir heute bereits sehen, treten schneller auf, als es noch vor 20 Jahren vorhergesagt

worden ist. Sie richten weitaus mehr Schaden an und betreffen viel größere Gebiete.

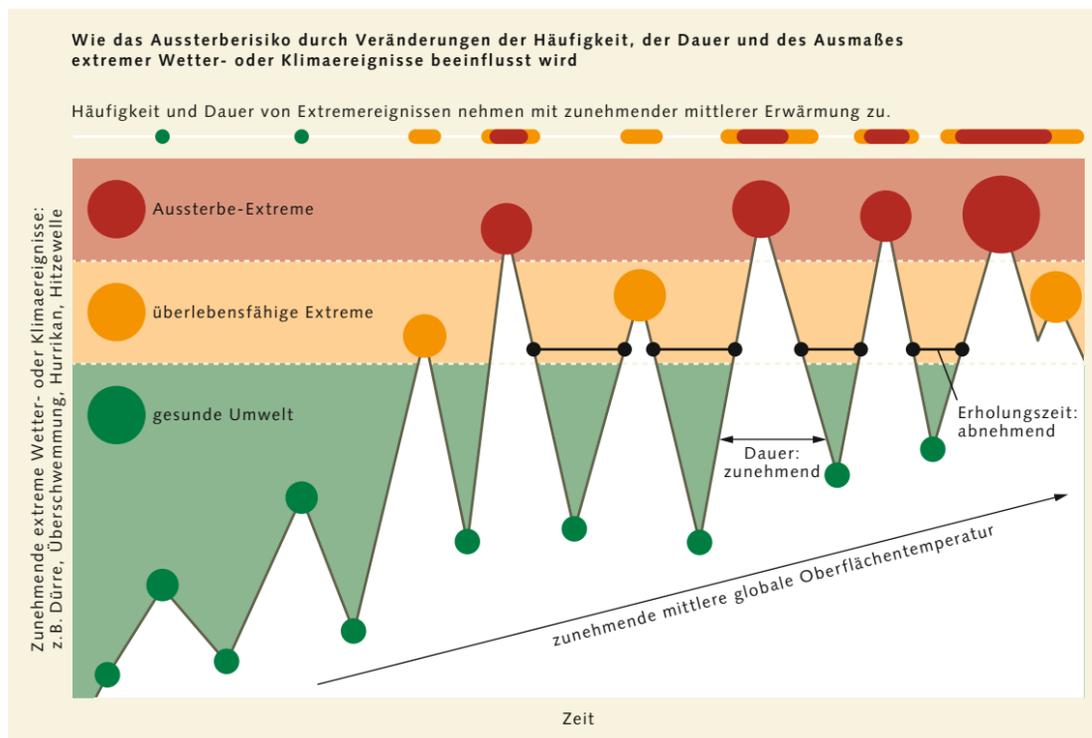
Im Zuge des Klimawandels verschiebt sich zum Beispiel der biologische Kalender vieler Lebensgemeinschaften, sodass ehemals fein aufeinander abgestimmte Ereignisse oder Abläufe nicht mehr zueinanderpassen. Im Meer beispielsweise blühen Algen jetzt früher, als Fischlarven aus dem Ei schlüpfen, denen sie eigentlich als Nahrung dienen. Ist der Fischnachwuchs dann endlich so weit entwickelt, dass er auf Futtersuche gehen kann, ist die Algenblüte längst abgeklungen. An Land wachen Winterschläfer verfrüht aus ihrer Winterruhe auf und suchen dann vergeblich nach Essbarem. Bäume und Blumen blühen, bevor Insekten sie bestäuben können, und Vogelküken reißen zu einem Zeitpunkt hungrig ihre Schnäbel auf, an dem die Elternpaare kaum noch ausreichend Insekten finden.

Um der zunehmenden Wärme zu entkommen, verlassen Tiere und Pflanzen auf der ganzen Welt ihre angestammten Lebensräume oder aber sterben lokal aus. Rund die Hälfte der Abertausend untersuchten Arten zei-

gen entsprechende Reaktionen. Meeresbewohner wandern polwärts oder in größere Tiefe ab, in der Hoffnung, dort die gewohnten Umgebungstemperaturen zu finden. Dabei verlagern sie ihre Lebensräume mittlerweile mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 59 Kilometern pro Jahrzehnt. Die Meereseerwärmung ist jedoch nicht der einzige Stressfaktor, der auf Tiere und Pflanzen einwirkt. Die Lebensbedingungen verschlechtern sich auch durch die zunehmende Versauerung und Sauerstoffarmut der Meere. Gemeinsam haben alle drei Faktoren in den zurückliegenden 50 Jahren zu einer Neuorganisation des Lebens im Meer geführt, auch und insbesondere an der Meeresoberfläche.

Lebewesen an Land ziehen ebenfalls Richtung Pol oder aber in höhere Lagen. Organismen, die nur langsam oder gar nicht Reißaus nehmen können, laufen Gefahr, zumindest lokal auszusterben. Das gilt für die Lebensgemeinschaften auf den Kontinenten ebenso wie für jene im Meer. Besonders geringe Überlebenschancen haben Organismen, die entweder in geografisch eng begrenzten Lebensräumen wie Tümpeln und Seen leben und somit

1.7 > Die zunehmende Häufigkeit und Intensität der Extremereignisse stellen eine echte Gefahr für Tiere und Pflanzen dar. Je öfter eine einzelne Art oder ein ganzes Ökosystem von einem Extremereignis betroffen ist und je weniger Zeit die Lebewesen haben, sich von diesem Schock zu erholen, desto höher ist das Risiko, dass sie lokal aussterben.



1.8 > Eine Korallenkolonie vor der Korallenbleiche (rechts) und danach (links). Wird das Wasser zu warm, stoßen die Korallen ihre Algen, die sie mit Nahrung versorgen, ab und verlieren deshalb ihre Farbe. Dauert dieser Zustand länger an, verhungert die Koralle.

keine Chance zur Abwanderung haben, oder diejenigen, die an die kalten Lebensbedingungen der Polar- und Hochgebirgsregionen angepasst sind. Diese Kälte-Spezialisten werden künftig kaum noch geeignete Rückzugsräume auf der Erde finden.

Erschwerend zu all dem kommt hinzu, dass die Folgen des Klimawandels für Natur und Artenvielfalt einhergehen mit anderen vom Menschen verursachten Stressfaktoren. Dazu gehören in erster Linie die weiträumige Zerstörung natürlicher Lebensräume durch das Abholzen von Wäldern, das Trockenlegen von Feuchtgebieten, die Verbauung der Küsten, das Überfischen der Meere und der Abbau von Rohstoffen. Eine wichtige Rolle spielen aber auch die Umweltverschmutzung, die unkontrollierte Flächenversiegelung sowie die Ausbreitung eingeschleppter Arten. Wo immer sich diese Stressfaktoren überlagern, verstärken sie sich gegenseitig in ihren Auswirkungen und schwächen die Widerstandskraft der natürlichen Ökosysteme. Der Klimawandel stellt somit für viele Lebensgemeinschaften einen Gefahrenmultiplikator dar. Mit zunehmender Erwärmung wird dieser für viele von ihnen sogar zu einer tödlichen Bedrohung. Denn eines steht fest: Mit jedem Zehntelgrad Erwärmung steigen die Auswirkungen und Klimarisiken für die Ökosysteme an Land und im Meer.

Die Weltmeere beispielsweise steuern infolge des Zusammenwirkens von Klimawandel und der Übernutzung des Meeres durch den Menschen auf ein Massenaussterben zu. Es wäre das sechste der jüngeren Erdgeschichte. Neue Forschung belegt: Sollten die Temperaturen in Atmosphäre und Meer weiter ansteigen, werden die Artenverluste infolge von Hitzestress und Sauerstoffmangel im Meer innerhalb der kommenden 75 Jahre genauso groß sein wie die Verluste durch Überfischung, Verschmutzung und Lebensraumzerstörung. In der Summe würden bei einem globalen Temperaturanstieg von bis zu 4,9 Grad Celsius bis zum Ende dieses Jahrhunderts so viele marine Arten aussterben, dass die Definitionsbedingungen eines Massenaussterbens erfüllt sind.

Besonders hoch wäre die Aussterberate dabei in den Polarregionen, weil sich die kälteadaptierten Organismen in Anbetracht der Geschwindigkeit der Veränderungen kaum anpassen können. Den höchsten Vielfaltsrückgang

aber würden die heute noch artenreichen Tropen verzeichnen. Deren Bewohner leben schon heute an ihrer oberen Temperaturgrenze. Die Forschung aber zeigt auch: Gelingt es, die Erderwärmung auf unter zwei Grad Celsius zu begrenzen, sinkt die Gefahr eines Massenaussterbens deutlich.

Gefahrenmultiplikator Klimawandel

Die Umwälzungen in der Natur haben weitreichende Auswirkungen auf uns Menschen. Stück für Stück versagen uns die Ökosysteme ihre elementar wichtigen Dienste (Ökosystemleistungen). Getreide, Obstbäume und andere Nutzpflanzen werden nicht mehr umfassend bestäubt; Rinder, Schafe und Ziegen finden nicht mehr ausreichend zu fressen; Küstenfischer holen vor allem in den warmen, tropischen Regionen immer öfter leere Netze ein, weil die Fischschwärme in kühlere Regionen abwandern. Außerdem werden Wasser und Luft in geringerem Umfang gereinigt, die Küsten weniger wirksam vor Erosion geschützt, beliebte Urlaubsorte verlieren mit den Wäldern, schneebedeckten Berghängen oder Korallenriffen ihre Hauptattraktionen. Parallel dazu leidet die psychische Gesundheit vieler Menschen, die im Wald spazieren gehen oder aber an das Meer fahren, um sich zu erholen. Kurz gesagt: Je umfassender sich die Ökosysteme verändern, desto mehr seiner Lebensgrundlagen verliert der Mensch.

Wasser: Entweder viel zu viel oder viel zu wenig

Die Auswirkungen des Klimawandels treffen uns Menschen und die von uns gebaute Umwelt aber auch unmittelbar: Mit der zunehmenden Häufigkeit von Starkregenereignissen steigt zum Beispiel das Hochwasserrisiko entlang von Flüssen in einigen Regionen der Welt. Das Schadenspotenzial solcher Naturkatastrophen ist Berechnungen zufolge in einer vier Grad Celsius wärmeren Welt vier- bis fünfmal höher, als wenn es gelingen würde, die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Doch selbst in einer 1,5 Grad Celsius wärmeren Welt werden mehr Menschen ihr Leben und ihr Hab und Gut an Hochwasser verlieren, als es aktuell noch der Fall ist. In Kolumbien, Brasilien und Argentinien beispielsweise würde die Zahl der von Flusshochwassern betroffenen Menschen

um 100 bis 200 Prozent zunehmen; in Ecuador betrüge dieser Anstieg 300 Prozent, in Peru sogar 400 Prozent.

Die steigenden Frühlings- und Wintertemperaturen wiederum führen zu einer verfrühten Schneeschmelze in den Gebirgen und somit zu Veränderungen der gewohnten Wasserstände in Gebirgsbächen und -flüssen. Für uns Menschen bedeutet diese Entwicklung, dass die Flüsse unter Umständen zu jenen Zeiten viel Wasser führen, wenn es kaum gebraucht wird, später im Jahr aber die Flusspegel zu niedrig sind, als dass die benötigte Menge entnommen werden kann.

Schon heute leidet mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung pro Jahr mindestens einen Monat lang unter akuter Wasserknappheit, die zumindest in Teilen vom Klimawandel verursacht wird – etwa durch extreme Trockenheit oder aber durch Überflutungen, Stürme und Starkregenereignisse, deren Folgen ebenfalls die Trinkwasserversorgung vielerorts gefährden. Besonders betroffen sind Dörfer, Städte und Gemeinden, deren Bewohner auf das Schmelzwasser der schrumpfenden Berggletscher angewiesen sind, sowie Menschen, die in Gebieten wohnen, in denen es keine zentrale Wasserversorgung gibt. Treten hier Flüsse über ihre Ufer oder versiegt eine natürliche Quelle aufgrund von Dürre, stehen oftmals Abertausende ohne Trinkwasser da.

Neben der Landwirtschaft, dem größten Wasserverbraucher der Welt, trifft die Wasserknappheit auch den Energiesektor: Seit den 1980er-Jahren hat die weltweit durch Wasserkraft erzeugte Strommenge aufgrund sinkender Wasserpegel und Durchflussmengen um vier bis fünf Prozent abgenommen. Stellenweise droht Wasserkraftwerken wegen Wassermangels sogar die Abschaltung. Wie ernst die Lage werden kann, zeigte bis zum Winter 2022/23 die Situation am Lake Powell, dem zweitgrößten Stausee der USA. Er liegt direkt auf der Grenze der beiden US-Bundesstaaten Utah und Arizona, wird durch den Colorado River gespeist und versorgt gemeinsam mit dem weiter flussabwärts liegenden Stausee Lake Mead rund 40 Millionen Menschen mit Trinkwasser. Gleichzeitig entnehmen Farmen entlang des gesamten Flusslaufes Wasser, um ihre Felder und Plantagen zu bewässern. Nach 22 Jahren Dürre im Westen der USA und einer stets zu hohen Wasserentnahme aus dem Colorado River war der Stausee Ende März 2022 nur noch zu

24 Prozent gefüllt. Sein Wasserpegel fiel allein im Zeitraum von 2019 bis 2022 um mehr als 30 Meter und damit fast unter einen kritischen Grenzwert, ab dem das Wasserkraftwerk am Staudamm des Sees keine Elektrizität mehr erzeugen kann. Die zuständige Bundesbehörde entschied deshalb, im weiteren Jahresverlauf weniger Wasser aus dem See abzulassen als gewöhnlich und weiter flussaufwärts die Stautore eines weiteren Reservoirs zu öffnen. Dadurch sollen zusätzliche Wassermassen in den Stausee geleitet werden. Die Dürre im Westen der USA zog sich über 22 Jahre und gilt mittlerweile als trockenste Periode der zurückliegenden 800 Jahre.

Ernährung: Harte Zeiten für Ackerbau, Tierhaltung und Aquakultur

Wo es viel zu viel oder mittlerweile nicht mehr zur richtigen Jahreszeit regnet, wird es schwieriger, Ackerbau zu betreiben und Nutztiere zu halten. Nach Angaben des Weltklimarates erleben Land- und Forstwirte, Fischer und Aquakulturfarmen weltweit schon heute so weitreichende negative Auswirkungen des Klimawandels, dass sie nicht mehr ausreichend Grundnahrungsmittel und Holz produzieren können, um die Bedürfnisse aller Menschen zu decken.

Die zunehmende Hitze und Trockenheit lassen Getreide und Tierfutter auf den Feldern verdorren, Krankheiten breiten sich aus. Im Meer fällt es Fischerfamilien aufgrund der zunehmenden Ozeanversauerung, steigender Wassertemperaturen und vieler Algenblüten (durch Überdüngung) immer schwerer, Muscheln und andere Meeresfrüchte großzuziehen. Gleichzeitig wird es im Zuge der Erwärmung immer aufwendiger und damit teurer, verderbliche Lebensmittel wie Obst und Gemüse sicher zu transportieren, zu lagern, zu verkaufen und auch zu Hause noch für ein paar Tage aufzubewahren. Der Klimawandel trifft somit nicht nur die Erzeuger, sondern die gesamte Handelskette bis hin zum Endkunden – und gefährdet auf diese Weise die Ernährungssicherheit auf der ganzen Welt.

Besonders groß fallen die Verluste aus, wenn Regionen von Extremereignissen wie Dürren, Überflutungen und Hitzewellen getroffen werden. Die Häufigkeit solcher plötzlichen Ernte- oder Produktionsausfälle an Land und im Meer hat seit den 1950er-Jahren stetig zugenommen

Massenaussterben
Von einem Massenaussterben spricht die Wissenschaft, wenn in einem Zeitraum von zumeist weniger als zwei Millionen Jahren mehr als 75 Prozent der Tier- und Pflanzenarten aussterben und ihre Rollen im Ökosystem nicht zeitnah wieder durch neue oder andere Arten ersetzt werden. In den zurückliegenden 540 Millionen Jahren war dies bereits fünfmal nachweislich der Fall, wobei sich die einzelnen Ereignisse über Zeitspannen von bis zu mehreren Millionen Jahren erstreckten.

und führt vielerorts zu Dominoeffekten. Wenn Ernten ausfallen, verlieren Bauernfamilien ihre Nahrungs- und Einkommensgrundlage. Gleichzeitig sind weniger Grundnahrungsmittel verfügbar, weshalb die Preise steigen und sich vor allem einkommensschwache Familien wichtige Nahrungsmittel nicht mehr leisten können. Die Folgen sind Hunger und Mangelernährung, unter denen vor allem Kinder gesundheitlich leiden. Entsprechende Entwicklungen lassen sich unter anderem in Asien, Zentral- und Mittelamerika, in den Regionen südlich der Sahara, in der Arktis sowie in den kleinen Inselstaaten beobachten – und abermals treffen die Auswirkungen des Klimawandels die Kleinbauern und Kleinfischer besonders hart.

Mit zunehmender Erwärmung wird sich die Situation zuspitzen – unter anderem, weil bei größerer Wärme mehr Wasser über die Blätter und aus dem Boden verdunstet. Das heißt, der Wasserbedarf der Landwirtschaft wird weiter zunehmen. Da gleichzeitig in vielen Regionen deutlich weniger Wasser in der Wachstumsperiode zur Verfügung stehen wird, vervielfachen sich die Risiken entsprechend. Drei Beispiele:

- Sollte sich die Welt bis zum Jahr 2100 um zwei Grad Celsius erwärmen, steigt die Wahrscheinlichkeit extremer Dürren in großen Teilen des nördlichen Südamerikas, im Mittelmeerraum, im Westen Chinas sowie in den hohen Breiten Europas und Nordamerikas um 150 bis 200 Prozent.
- Waren im Zeitraum von 1981 bis 2005 etwa 40 Prozent der landwirtschaftlichen Flächen (rund 3,8 Millionen Quadratkilometer) von Wasserknappheit betroffen, werden es einer neuen Studie zufolge bis zum Jahr 2050 mehr als 80 Prozent sein – selbst dann, wenn sich die Erde bis 2050 nur um 1,6 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit erwärmen sollte.
- Im selben Zeitraum werden allein die Folgen des Klimawandels dazu führen, dass voraussichtlich acht bis 80 Millionen Menschen in Südasien, Zentralamerika und südlich der Sahara nicht mehr ausreichend zu essen haben und Hunger leiden werden. Ihre genaue Zahl hängt vom Erwärmungsniveau und damit vom Ausmaß des künftigen Klimawandels ab.

Gesundheit: Die Grenze des menschlich Erträglichen

Die Folgen des Klimawandels beeinträchtigen sowohl die physische als auch die psychische Gesundheit von Menschen in allen Regionen der Welt. Über starke psychische Belastungen klagen vor allem Menschen, die extremen Wetterereignissen ausgesetzt oder aber währenddessen als Rettungskräfte im Einsatz waren. Ferner diejenigen, die infolge des Klimawandels ihren Lebensunterhalt verlieren oder sogar ihr Zuhause, ihre Heimat oder aber kulturelle Werte aufgeben müssen. Die physische Gesundheit wird vor allem durch Hitzeextreme beeinträchtigt. Steigende Lufttemperaturen sowie heißere und länger andauernde Hitzewellen haben weltweit zu mehr Erkrankungen und einer erhöhten Sterblichkeit geführt, auch in den mittleren Breiten. Leidtragende sind vor allem Alte und Kranke sowie im Freien arbeitende Menschen. Letztere verdienen überdies vielerorts kein Geld, wenn extreme Hitze die Arbeit auf Feldern oder Baustellen unmöglich macht.

Besonders gefährlich wird extreme Wärme, wenn sie zusammen mit sehr hoher Luftfeuchtigkeit auftritt. Ist die Luft nämlich so feucht, dass Wasser und demzufolge auch Schweiß nicht mehr richtig verdunsten können, versagt die körpereigene Kühlung des Menschen. Unser Körper heizt sich dann mehr und mehr auf, bis irgendwann der Kreislauf kollabiert. Im Extremfall droht dann sogar der Hitzetod.

Die Hitzetoleranz-Grenze des Menschen kann mithilfe der sogenannten Kühlgrenztemperatur bestimmt werden. Sie berücksichtigt sowohl die Umgebungstemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit. Bislang ging man davon aus, dass ein gesunder Mensch eine Kühlgrenztemperatur von 35 Grad Celsius nicht viel länger als sechs Stunden überleben kann. Diese Grenze ergibt sich aus der Kombination von Temperatur und Luftfeuchte und entspricht 35 Grad Celsius bei 100 Prozent Luftfeuchte oder 46 Grad Celsius bei 50 Prozent Luftfeuchtigkeit.

Als Forschende der US-amerikanischen Pennsylvania State University diese Annahme nun erstmals in Belastungsexperimenten überprüft, stellte sich heraus, dass die theoretisch gezogene Grenze viel zu hoch angesetzt war. In Klimakammern mit hoher Luftfeuchtigkeit reichte schon eine Raumtemperatur von 30 bis 31 Grad Celsius

aus, um die Körper-Kerntemperatur junger, gesunder Testpersonen gefährlich ansteigen zu lassen. Entgegen aller Erwartungen führte auch ein leichtes Absinken der Luftfeuchtigkeit nicht zu einer steigenden Hitzetoleranz der Probanden. Stattdessen lag die kritische Kühlgrenztemperatur unter diesen Bedingungen sogar bei 25 bis 28 Grad Celsius und damit fast zehn Grad niedriger als bis dato in der Wissenschaft angenommen. Als Grund führte das Forscherteam an, die Probanden hätten trotz geringerer Luft-

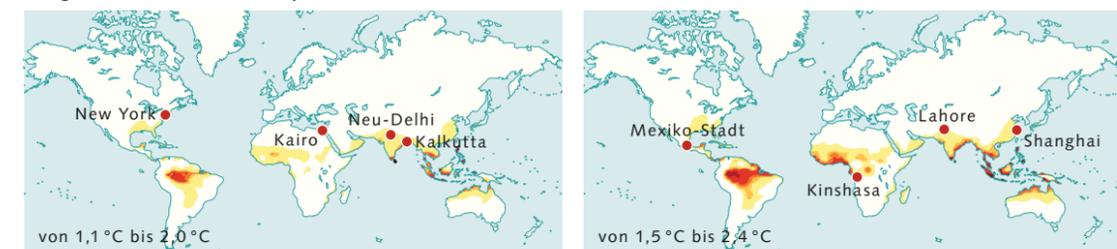
feuchtigkeit ihre Schweißproduktion ab einem bestimmten Temperaturwert nicht weiter erhöht.

Angesichts des fortschreitenden Klimawandels sind diese Forschungsergebnisse besorgniserregend. Sie zeigen, dass die Hitzegefahr für Menschen bislang unterschätzt wurde und es mit zunehmender globaler Erwärmung immer mehr Regionen geben wird, in denen der Hitzestress zeitweise so groß sein wird, dass man ihn ohne zusätzliche Kühlung nicht überleben wird.

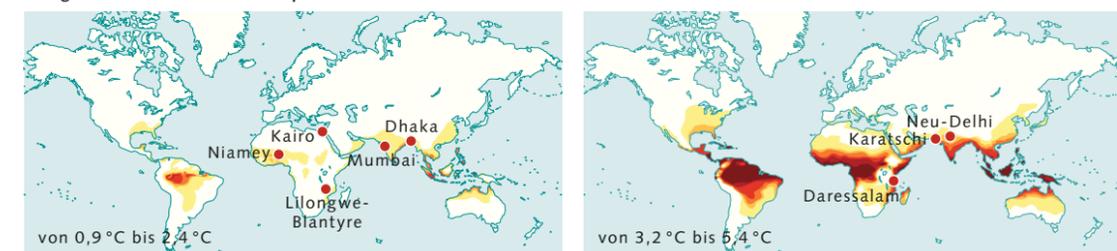
Dauer der Hyperthermiephasen infolge extremer Hitze und Luftfeuchtigkeit



Dauer der Hyperthermiephasen infolge extremer Hitze und Luftfeuchtigkeit bei einem Anstieg der globalen Oberflächentemperatur Mitte des 21. Jahrhunderts (2050)



Dauer der Hyperthermiephasen infolge extremer Hitze und Luftfeuchtigkeit bei einem Anstieg der globalen Oberflächentemperatur Ende des 21. Jahrhunderts (2100)



1.9 > Trifft extreme Hitze auf hohe Luftfeuchtigkeit, können Menschen schnell überhitzen – ein lebensgefährlicher Zustand. Diese Grafik des Weltklimarates zeigt, in welchen Regionen der Erde Menschen künftig an wie vielen Tagen im Jahr unter „Hyperthermie“, „der Fachausdruck, leiden werden. Die Kernaussage: Je schneller der Klimawandel gebremst wird, desto weniger Menschen werden dieser Lebensgefahr ausgesetzt sein.

Besonders schwierig dürfte die Situation langfristig für all jene Menschen werden, die in den Millionenstädten der Tropen und Subtropen leben. Zum einen sind dort die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit nahezu das ganze Jahr hindurch hoch; zum anderen kommt der sogenannte Wärmeinseleffekt zum Tragen. Er besagt, dass sich am Tag die Luft in städtischen Ballungsräumen stärker erwärmt als in deren unbebauter Umgebung. Nachts kühlt sie zudem weniger schnell ab. Daraus folgt, dass es in den Millionenstädten der Tropen und Subtropen nur eines vergleichsweise kleinen Temperatursprungs bedarf, um die innerstädtische Lufttemperatur so weit in die Höhe zu treiben, dass sie die Hitzetoleranz-Grenze vieler Menschen überschreitet.

Hinweise darauf, dass Stadtbewohner in der Regel viel höheren Temperaturen ausgesetzt sind, als sie für eine Region angegeben sind, existieren mittlerweile viele. Als zum Beispiel Indien und Pakistan im Mai 2022 von einer schweren Hitzewelle mit Tageshöchsttemperaturen von bis zu 51 Grad Celsius getroffen wurden, war es in Indiens Hauptstadt Neu-Delhi und in benachbarten Städten auch mitten in der Nacht noch 35 bis 39 Grad Celsius heiß,

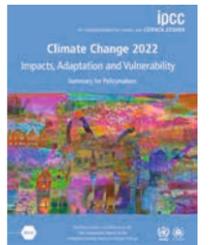
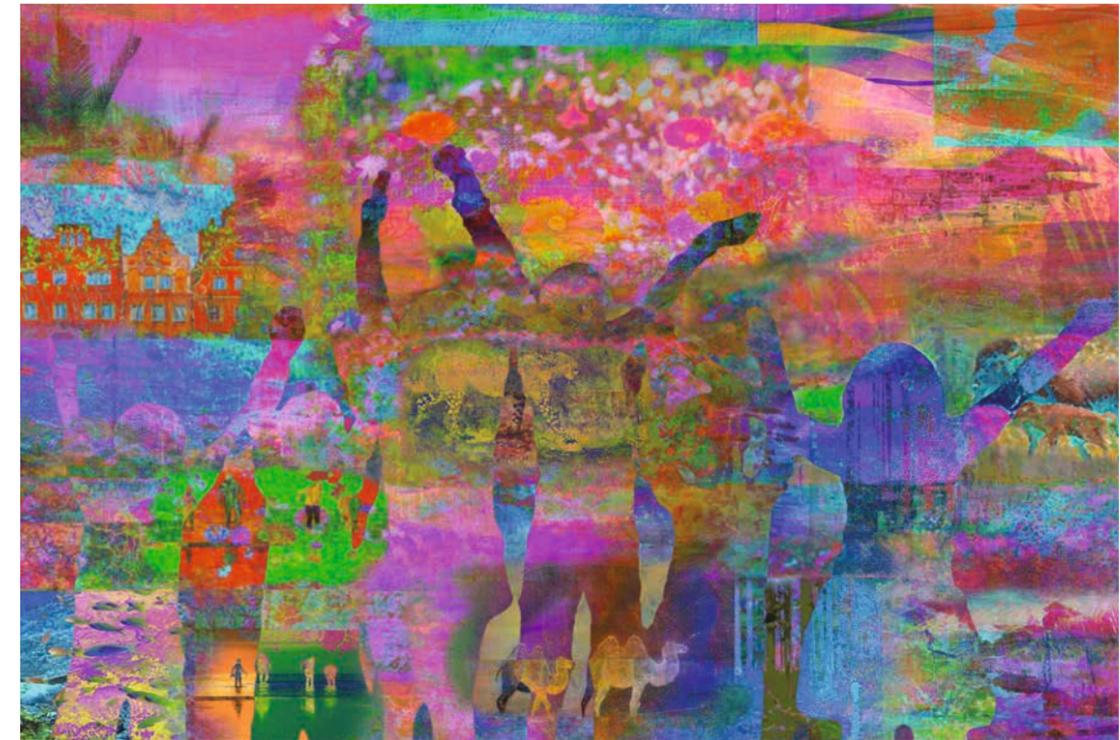
während sich die Luft über den umliegenden Feldern und Wäldern auf erträgliche 15 Grad Celsius abgekühlt hatte. Anschließende Analysen eines internationalen Forscherteams ergaben: Der menschengemachte Klimawandel hatte die Wahrscheinlichkeit einer solchen Rekord-Hitzewelle verdreißigfacht.

Der Klimawandel ermöglicht aber auch eine Ausbreitung vieler Infektionskrankheiten. Dürren zum Beispiel erhöhen das Risiko, dass Brunnen versiegen, extreme Niederschläge dagegen, dass sie geflutet oder verschmutzt werden. Pumpen die Menschen ihr Trinkwasser in beiden Fällen aus verunreinigten Quellen, steigt die Gefahr, an bakteriellen Infektionskrankheiten wie Cholera zu erkranken. Die zunehmende Wärme ermöglicht es *Aedes*-Stechmücken, ihr Verbreitungsgebiet von den Tropen aus Richtung Norden und Süden auszuweiten. Die Insekten übertragen unter anderem Dengue- und Gelbfieberviren. Das Risiko, an Denguefieber zu erkranken, steigt bereits weltweit. Infolge von Waldbränden, die mittlerweile häufiger auftreten und größere Flächen betreffen, nimmt in den betroffenen Regionen die Gefahr von Atemwegs-erkrankungen zu.

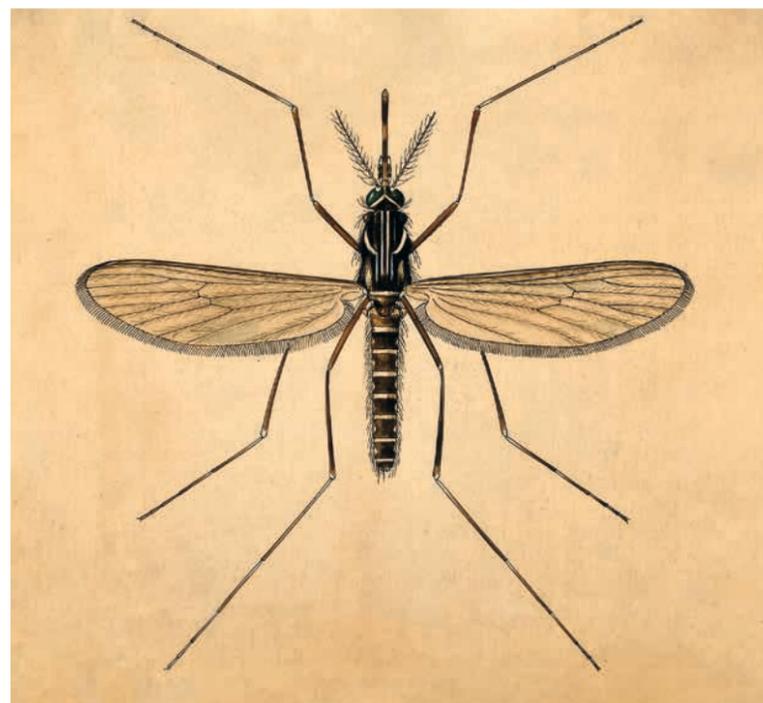
Meeresspiegel: Land unter!

Infolge der steigenden Meeresspiegel werden sich die Klimarisiken für Mensch, Natur und gebaute Strukturen in den Küstenregionen der Welt bis zum Jahr 2100 mindestens verzehnfachen, vor allem weil extrem hohe Fluten häufiger auftreten werden. Besonders gefährlich werden die steigenden Pegel den Abermillionen Menschen, die in niedrig gelegenen Küstenregionen sowie auf kleinen Inseln leben. Steigende Meeresfluten zerstören die artenreichen Ökosysteme im Gezeitenbereich, versalzen Grundwasserreservoirs und überspülen große Landflächen – Küstenwälder und Ackerland ebenso wie die küstennahen Stadtteile vieler Küstenmetropolen. Deren unkontrolliertes Wachstum trägt dazu bei, dass die stetig steigenden Meeresspiegel über die Zeit betrachtet immer mehr Menschen gefährden. In Afrika beispielsweise werden bereits im Jahr 2030 zwischen 108 und 116 Millionen Menschen in Regionen mit hohem Überflutungsrisiko leben. Im Jahr 2000 waren es nur 54 Millionen.

Global betrachtet liegt die Zahl der Betroffenen um ein Vielfaches höher: Nach Angaben des Weltklimarates



1.11 > Bunte Collage auf der Titelseite des sechsten Weltklimaberichts zu Klimafolgen, Anpassung und Verwundbarkeit. Erschienen ist er im Februar 2022. Seine wichtigste Botschaft: Die Menschheit weiß, was zu tun ist, um die Folgen des Klimawandels zu mindern. Was fehlt, ist entschlossenes Handeln weltweit.



1.10 > *Aedes*-Stechmücken werden auch Gelbfieber- oder Denguemücken genannt, denn sie übertragen beide Krankheiten. Im Zuge des Klimawandels wächst ihr Verbreitungsgebiet. Ursprünglich nur in den Tropen und Subtropen beheimatet, kommen die Insekten jetzt auch weiter nördlich und südlich vor.

werden im Jahr 2050 weltweit mehr als eine Milliarde Menschen in Küstenstädten und küstennahen Ballungszentren mit einem hohen Überflutungsrisiko leben. Ihnen drohen nicht nur wiederkehrende Sturmfluten, sondern auch die dauerhafte Überflutung ihrer Dörfer und ihrer Stadtteile.

Klimaanpassung: Die Welt ist unvorbereitet

Um die Folgen und Risiken des Klimawandels zu reduzieren, müssen sich Mensch und Natur an die neuen Umweltbedingungen anpassen. Für uns Menschen bedeutet das in erster Linie, Maßnahmen zu ergreifen, die unser Leben sowie unser Hab und Gut vor hohen Temperaturen, Wetterextremen und steigenden Meeresspiegeln schützen. Gelingen kann das, indem wir aus gefährdeten Regionen wegziehen oder aber unser Leben vor Ort verändern – beispielsweise indem wir Siedlungen und Städte begrünen, um den Wärmeinseleffekt zu minimieren, oder indem wir mit Wasser so sparsam haushalten, dass unsere Reserven auch für Dürrezeiten reichen.

Die Liste der Lösungsvorschläge ist lang. Dennoch kommt der Weltklimarat zu dem Schluss, dass weltweit bisher weitaus weniger Schutzvorkehrungen geplant und umgesetzt wurden, als notwendig sind, um alle Menschen wirkungsvoll und nachhaltig zu schützen. Dabei ist das Bewusstsein für die zunehmenden Gefahren durchaus gestiegen. Mehr als 170 Staaten und viele Städte haben mittlerweile Pläne zur Klimaanpassung aufgestellt. Unternehmen und Akteure der Zivilgesellschaft setzen sich ebenfalls für mehr Anpassung ein. Vielerorts werden auch Pilotprojekte durchgeführt. Diese aber zielen oft nur darauf ab, das lokale Sturm-, Flut-, Hitze- oder Dürreerisiko zu minimieren, und führen daher nur zu kleinen Veränderungen mit regional und zeitlich begrenzter Wirksamkeit.

Um den drohenden Klimagefahren langfristig trotzen zu können, bedarf es ganzheitlicher Konzepte und grundlegender Anpassungen in unserer Lebensweise, wie wir arbeiten, wie wir unsere Nahrung erzeugen und die Natur behandeln und wie wir unsere Städte und Siedlungen planen und bauen. Derzeit, so das Fazit des Weltklimarates, sei die Menschheit vollkommen unvorbereitet auf all das,

Das Klima-Gerechtigkeitsproblem: Die größte Last tragen die Armen

Der Klimawandel stellt die Menschheit vor ein wachsendes Gerechtigkeitsproblem. Unter den Folgen globaler Erwärmung und zunehmender Extremereignisse leiden nämlich vor allem einkommensschwache und gesellschaftlich ausgegrenzte Bevölkerungsgruppen. Für sie stellt der Klimawandel oftmals ein existenzielles Problem dar, denn er multipliziert ihre ohnehin schon großen wirtschaftlichen, sozialen und gesundheitlichen Sorgen und Probleme um ein Vielfaches. Die erhöhte Verwundbarkeit einkommensschwacher und gesellschaftlich ausgegrenzter Bevölkerungsgruppen für Klimagefahren speist sich aus drei Quellen:

- Die Ärmsten leben in der Regel in Gebieten, in denen sie Wetterextremen und anderen Naturgefahren im besonderen Maß ausgesetzt sind. Dazu zählen Slums entlang von Flussläufen (Hochwassergefahr), illegal erbaute Häuserzüge an Berghängen (Erdrutschgefahr nach Starkregen) oder auch Siedlungen ohne alte Baumbestände, die in extrem heißen Phasen Schatten und Kühlung spenden könnten.
- Einkommensschwachen Familien fehlen häufig das Geld und zumeist auch die infrastrukturellen Voraussetzungen, um Klima- und Wetterextremen erfolgreich trotzen zu können. Dazu gehören eine stabile Energie- und Trinkwasserversorgung, Zugang zu sanitären Einrichtungen und Schutzräumen, eine gute Gesundheitsversorgung sowie eine verlässliche Versorgung mit allen wichtigen Grundnahrungsmitteln. Zudem arbeiten einkommensschwache Bevölkerungsgruppen sehr häufig in Berufsfeldern, in denen sowohl ihr Verdienst als oft auch ihre Nahrungsmittelversorgung stark vom Klima abhängen – so zum Beispiel in der Landwirtschaft oder in der Fischerei.
- Einkommensschwache und gesellschaftlich ausgegrenzte Bevölkerungsgruppen werden in politische Entscheidungsprozesse häufig nicht mit einbezogen und ihre Bedürfnisse werden wenig oder gar nicht berücksichtigt. Der Weltklimarat kommt unter anderem zu dem Schluss, dass in einkommensschwachen Gebieten die Kluft zwischen den notwendigen Maßnahmen zur Klimaanpassung auf der einen und den tatsächlich umgesetzten Maßnahmen auf der anderen Seite deutlich größer ist als in jenen Gegenden, in denen Menschen mit höherem Einkommen leben.

Weltweit leben mittlerweile 3,3 bis 3,6 Milliarden Menschen in Gebieten mit einer besonders hohen Anfälligkeit für die Folgen des Klimawandels. Was das heißt, zeigen unter anderem die Sterblichkeitsraten: In Regionen mit hoher Verwundbarkeit für die Folgen des Klimawandels starben

im zurückliegenden Jahrzehnt zum Beispiel 15-mal mehr Menschen an den Folgen von Stürmen, Überflutungen und Dürren als in Ländern mit geringerer Klimaverwundbarkeit. Gleichzeitig sind einkommensschwache Menschen vergleichsweise häufiger extremer Hitze ausgesetzt, eben weil sie als Bauern, Landschaftsgärtner, Bauarbeiter oder Handwerker viel im Freien arbeiten.

Anpassung und Teilhabe:

Die Widerstandskraft verwundbarer Gruppen stärken

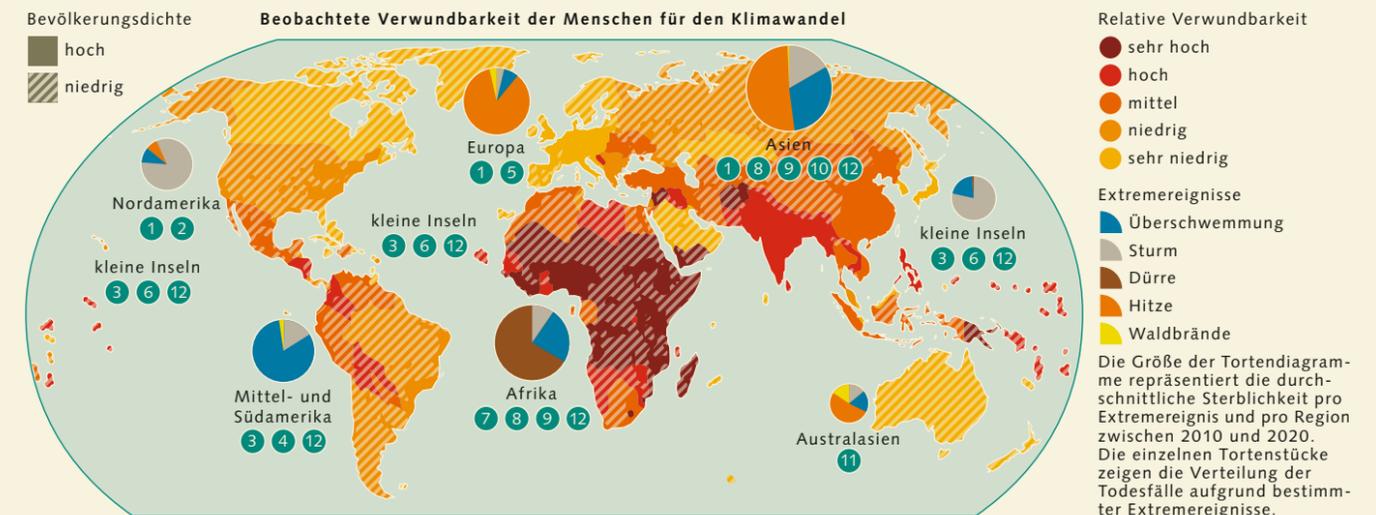
Basierend auf diesen Erkenntnissen hat der Weltklimarat ein Konzept für eine klimaresiliente Entwicklung erstellt, welches vorwiegend auf die Bedürfnisse der besonders gefährdeten Bevölkerungsgruppen eingeht. Im Kern kombiniert dieses Konzept Strategien zur Klimaanpassung und Treibhausgasreduktion so geschickt miteinander, dass gleichzeitig auch viele andere gesellschaftliche Herausforderungen angegangen werden können – etwa der Kampf gegen Hunger und Armut und gegen die Benachteiligung von Frauen.

Eine erfolgreiche Umsetzung ist jedoch an eine Vielzahl von Bedingungen geknüpft, die im Grunde eine Transformation des menschlichen Miteinanders sowie eine Abkehr von aktuellen Wertvorstellungen, Wirtschaftssystemen und Lebenszielen erfordern. Wenn es gelingen soll, die Erde als lebenswerten Planeten für Mensch und Natur zu erhalten, muss die Menschheit ab sofort:

- *mindestens 30 bis 50 Prozent der Land- und Meeresflächen schützen und nachhaltig nutzen:* Das heißt, es dürfen nur so viele natürliche Rohstoffe (Fisch, Holz etc.) entnommen werden, wie auch wieder nachwachsen können;
- *bei Entscheidungen alle betroffenen Bevölkerungsgruppen von Anfang an in die Debatte mit einbeziehen:* Das setzt transparente, demokratisch organisierte Prozesse voraus, in denen über alle gesellschaftlichen Grenzen hinweg zusammengearbeitet und unterschiedliche Interessen, Werte und Weltansichten auf faire Weise gegeneinander abgewogen werden;
- *alle Entscheidungen auf Grundlage von Expertenwissen treffen:* Gehört werden müssen neben Vertretern aus Wissenschaft und Ingenieurwesen auch die der lokalen Expertise und lokalen Interessenverbände sowie Ureinwohnerinnen und Ureinwohner;
- *Fragen der Gerechtigkeit und Fairness eine hohe Priorität einräumen:* Nur wenn einkommensschwache oder aber ausgegrenzte Bevölkerungsgruppen eine Stimme erhalten und diese Stimme auch gehört und berücksichtigt wird, kann sich an ihrer prekären Situation etwas ändern. Zu diesen bislang ausgegrenzten Bevölkerungsgruppen zählen vielerorts vor allem Frauen, Jugendliche und Ureinwohner;

- *ausreichend Geld für Maßnahmen zur Klimafolgenanpassung sowie für eine Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft zur Verfügung stellen;*
- *grenz- und staatenübergreifend zusammenarbeiten.*

Eine solche Transformation wäre schon in einer Welt ohne Klimawandel eine gigantische gesellschaftliche Herausforderung. Berechnet man die vom Klimawandel verursachten Schäden und Verluste mit ein, verschärft sich die Ausgangslage, denn mit jedem Zehntelgrad zusätzlicher Erwärmung verkleinert sich unser Handlungsspielraum. Der Weltklimarat bringt klar auf den Punkt, was auf dem Spiel steht, indem er schreibt: In einer mehr als zwei Grad wärmeren Welt hat die Menschheit vermutlich keine Chance mehr, eine lebenswerte Zukunft für alle Erdenbürger zu gestalten.



Innerhalb der Länder kann die Verwundbarkeit variieren. Beispiele für besonders verwundbare lokale Gruppen sind:

- 1 indigene Völker der Arktis: Ungleichheit die Gesundheit betreffend, eingeschränkter Zugang zu ursprünglichen Jagdgründen und Lebensgewohnheiten
- 2 städtische ethnische Minderheiten: strukturelle Ungleichheit, Marginalisierung, Ausschluss von Planungs- und Entscheidungsprozessen
- 3 kleinbäuerliche Kaffeeproduzenten: begrenzter Marktzugang und -stabilität, Abhängigkeit von nur einer Pflanzenart, begrenzte institutionelle Unterstützung
- 4 indigene Völker im Amazonasgebiet: Landdegradation, Entwaldung, Armut, fehlende Unterstützung
- 5 ältere Menschen, insbesondere arme und sozial isolierte: Gesundheitsprobleme, Behinderungen, begrenzte Hilfe und Unterstützung
- 6 Inselgemeinschaften: begrenztes Land, Bevölkerungswachstum und Verschlechterung der Küstenökosysteme
- 7 Kinder in ländlichen Gemeinden mit niedrigem Einkommen: Ernährungsunsicherheit, Anfälligkeit für Unterernährung und Krankheiten
- 8 Menschen, die durch Konflikte im Nahen Osten und in der Sahelzone entwurzelt wurden: verlängerter ungesicherter Status, eingeschränkte Mobilität
- 9 Frauen und non-binäre Menschen: begrenzter Zugang zu und eingeschränkte Kontrolle über Ressourcen, zum Beispiel Wasser, Land, Kredite
- 10 Migranten: informeller Status, begrenzter Zugang zu Gesundheitsdiensten und Unterkünften, Ausschluss von Entscheidungsprozessen
- 11 Aborigines und Torres-Strait-Inselbewohner: Armut, Ernährungs- und Wohnungsunsicherheit, räumliche Trennung von der Gemeinschaft
- 12 Menschen, die in informellen Siedlungen oder Slums leben: Armut, begrenzte Grundversorgung und oft in Gebieten mit hohen Klimagefahren lebend

1.12 > Überall auf der Welt sind die Menschen den Folgen des Klimawandels ausgesetzt. Allerdings gibt es besonders vulnerable Gruppen, die Extremereignissen wie Hitzewellen, Dürrephasen, Stürmen, Überschwemmungen und Waldbränden weniger als andere entgegensetzen haben.



1.13 > Ein eindrücklicher Vergleich: In der US-amerikanischen Metropole Los Angeles gibt es nur in jenen Stadtvierteln ausreichend Schatten spendende Straßenbäume, in denen die Anwohnenden genügend Geld haben, sich um den Erhalt der Bäume zu kümmern (oben). In ärmeren Vierteln hingegen fehlen die Bäume, weil auch die Stadtverwaltung nicht in Straßenbäume investiert. Die Menschen dort finden bei Hitze deshalb keinen kühlenden Baumschatten vor ihrer Haustür.

was uns im Zuge des Klimawandels noch bevorsteht – vor allem, wenn sich die Welt um mehr als 1,5 Grad Celsius erwärmt. Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sprechen in diesem Zusammenhang von einer Anpassungslücke. Diese ist vor allem in jenen Regionen besonders groß, in denen die Menschen arm und in besonderem Maß den Klimagefahren ausgesetzt sind. Hinzu kommt: Vergleicht man die derzeit in Planung befindlichen Anpassungsmaßnahmen mit den wissenschaftlich vorhergesagten Klimafolgen, so ist heute schon absehbar, dass diese Anpassungslücke stetig wachsen wird.

Die Grenzen der Anpassung

Neu ist auch die Klarheit, mit welcher der Weltklimarat mittlerweile die Grenzen der menschlichen Anpassung an den Klimawandel beschreibt. Dabei unterscheidet er zwischen harten und weichen Grenzen. Harte Grenzen lassen sich durch keinerlei Maßnahmen mehr überwinden. Wenn beispielsweise eine Atollinsel im Zuge des Meeresspiegelanstieges von Wellen überspült wird und alle Trinkwasserreserven vollständig versalzen sind, gibt es für die Inselbewohner langfristig keine andere Option mehr, als ihre Heimat zu verlassen. Gleiches gilt für Pflanzen und Tiere, die bereits an ihrer oberen Temperaturgrenze leben. Erwärmt sich ihr Lebensraum weiter, müssen sie zwangsläufig abwandern.

Weiche Grenzen hingegen lassen sich überwinden. Dazu bedarf es jedoch eines politischen Willens, ausreichend Geldes sowie wissenschaftlichen und lokalen Know-hows. Wenn alle vier Faktoren gegeben sind, können zum Beispiel Bauern in von Dürren geplagten Regionen neue, trockenresistente Arten anbauen und moderne Bewässerungssysteme installieren, sodass ihr Wasserverbrauch Seen, Flüsse oder aber Grundwasserspeicher schont.

Allerdings lässt sich heute schon konstatieren, dass viele Tier- und Pflanzenarten ihre harten Anpassungsgrenzen bereits erreicht haben oder kurz davor stehen. Sollten sie lokal aussterben, bedeutet das für die Abermillionen Bauern-, Fischer- und Hirtenfamilien, die von ihnen abhängen, das Ende ihres bisherigen Einkommenserwerbs. Der zunehmende Schnee- und Gletscherrückgang wird ab einer globalen Erwärmung von 1,5 Grad Celsius

dazu führen, dass Menschen, deren Wasserversorgung vom Schmelzwasser abhängt, nicht mehr ausreichend Trinkwasser haben werden. Und ab einer Erwärmung von zwei Grad Celsius wird es in vielen Getreideanbaubereichen der Welt deutlich schwieriger, erfolgreich Ackerbau zu betreiben.

Diese wenigen Beispiele für Anpassungsgrenzen zeigen: Je schneller die Menschheit den Klimawandel eindämmt, umso mehr Möglichkeiten verbleiben ihr, sich an die neuen Lebensbedingungen anzupassen, und desto wirksamer werden diese Optionen sein. Maßnahmen, die in einer 1,5 Grad wärmeren Welt noch funktionieren, können in einer zwei Grad wärmeren Welt bereits völlig wirkungslos sein. Daher muss die Effektivität aller Anpassungsaktivitäten auch stetig überwacht und die Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen regelmäßig kontrolliert werden.

Klima, Mensch und Natur gewinnen nur zusammen

Der sechste Sachstandsbericht des Weltklimarates betont zudem das neue Grundverständnis, welches die Wissenschaft mittlerweile für die engen Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Natur, Menschheit und Klima entwickelt hat. Schwächt der Mensch beispielsweise die Artenvielfalt, indem er die natürlichen Lebensräume zerstört und ihre Ressourcen rigoros ausbeutet, beraubt er sich damit seines wichtigsten Partners im Kampf gegen den Klimawandel. Gleichzeitig forciert die Menschheit durch ihren anhaltend hohen Ausstoß von Treibhausgasen den klimabedingten Niedergang der natürlichen Ökosysteme.

Aus dieser Konfliktspirale auszubrechen und bisherige Fehlentwicklungen umzukehren, muss fortan Ziel allen menschlichen Handelns sein. Das bedeutet unter anderem, Mensch, Natur und Klima im Einklang miteinander zu denken – tagtäglich und bei jeder einzelnen Entscheidung, ganz egal, ob nun auf lokaler, nationaler oder internationaler Ebene. Nur so kann es gelingen, Lösungen zu finden, die langfristig allen drei Systemen zugutekommen und heutigen ebenso wie kommenden Generationen eine lebenswerte Zukunft auf dem Planeten Erde garantieren.

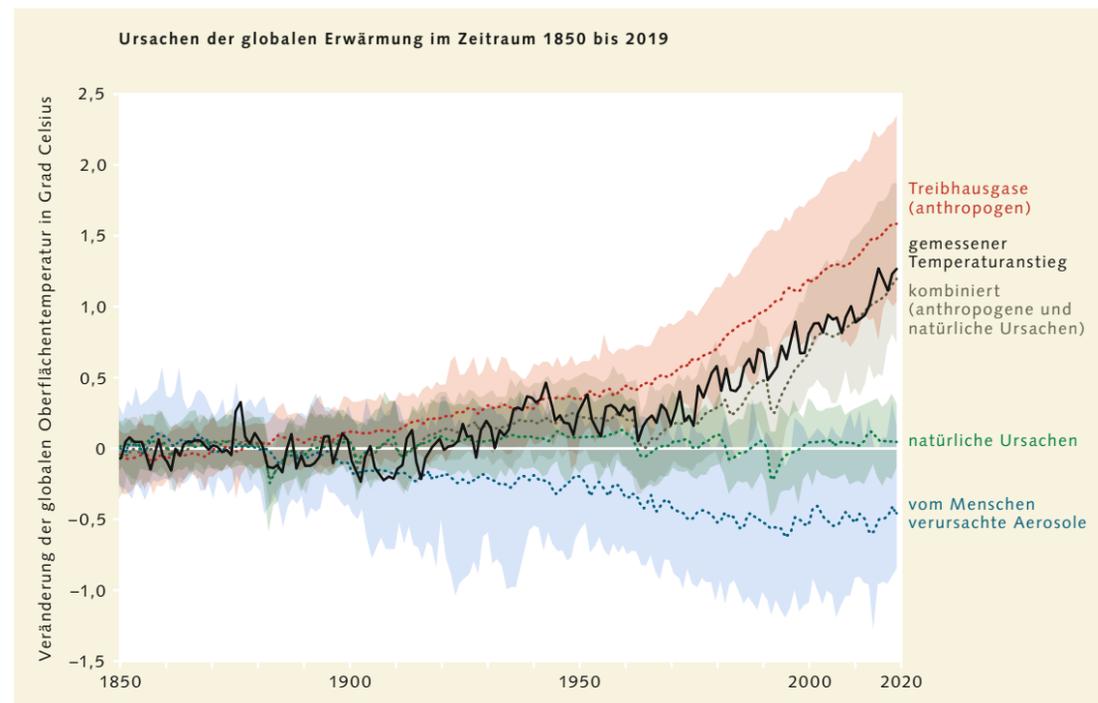
Lösungen für das Treibhausgas-Problem?

> Der Klimawandel ist menschengemacht und eindeutig auf den ungebremsten Ausstoß von Treibhausgasen zurückzuführen. Ein Emissionsstopp ist daher der einzige Ausweg aus der Klimakrise. Vorschläge, wie die Menschheit einen Großteil ihrer Emissionen vermeiden kann, gibt es inzwischen zuhauf. Allerdings ist auch gewiss, dass sich bis zum Jahr 2050 nicht alle Emissionen vermeiden lassen werden – selbst bei größter Anstrengung nicht. Diese Restmengen wird die Menschheit ausgleichen müssen: durch eine gezielte Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre.

Der Mensch allein verantwortlich den Klimawandel und seine Folgen

Den Klimawandel und seine drastischen Folgen zu stoppen ist Aufgabe des Menschen, denn er allein hat die bisherige globale Erwärmung zu verantworten. Der Klimawandel ist menschengemacht, daran gibt es keinerlei Zweifel mehr. Nach Angaben des Weltklimarates kann die globale Erwärmung der zurückliegenden 120 bis 170 Jahre eindeutig auf vom Menschen freigesetzte Treibhausgase zurückgeführt werden. Zu diesen zählen in erster Linie Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid (Lachgas), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) sowie 16 weitere Chemikalien.

Angereichert in der Atmosphäre bewirken diese Treibhausgase, dass unser Planet Erde zunehmend weniger Wärmeenergie in das Weltall abstrahlen kann. Die Wärme verbleibt stattdessen in der Erdatmosphäre und heizt zunächst deren Luftmassen, später auch den Ozean auf. Das physikalische Prinzip dahinter ist dasselbe wie in einem Gartengewächshaus. Aus diesem Grund werden die physikalischen Auswirkungen steigender Treibhausgaskonzentrationen auch als Treibhauseffekt bezeichnet. Wichtig ist zu wissen: Einen Teil der durch Treibhausgase ausgelösten Gesamterwärmung spüren Mensch und Natur noch nicht, weil er durch kühlend wirkende Aerosole wie Rußpartikel und Schwefeldioxyde sowie durch Veränderungen des Reflexionsvermögens der Erdoberfläche maskiert wird.



1.14 > Die Menschheit verantwortet den Klimawandel. Das weiß man, weil sich die gemessene Erderwärmung (schwarze Linie) nur dann realistisch in Klimamodellen darstellen lässt, wenn die Modelle sowohl die natürlichen als auch alle menschlichen Einflussfaktoren berücksichtigen (graue gepunktete Linie und Schattierung).

1.15 > Die globale Erwärmung ist auf die Treibhausgasemissionen des Menschen zurückzuführen. Kühlend wirken bislang vor allem vom Menschen zu verantwortende Aerosole, die sich vor allem aus Schwefel- und Stickoxid bilden und einfallendes Sonnenlicht ins Weltall zurückstrahlen.

Ohne diese kühlende Komponente betrüge die globale Erwärmung bereits heute 1,5 Grad Celsius.

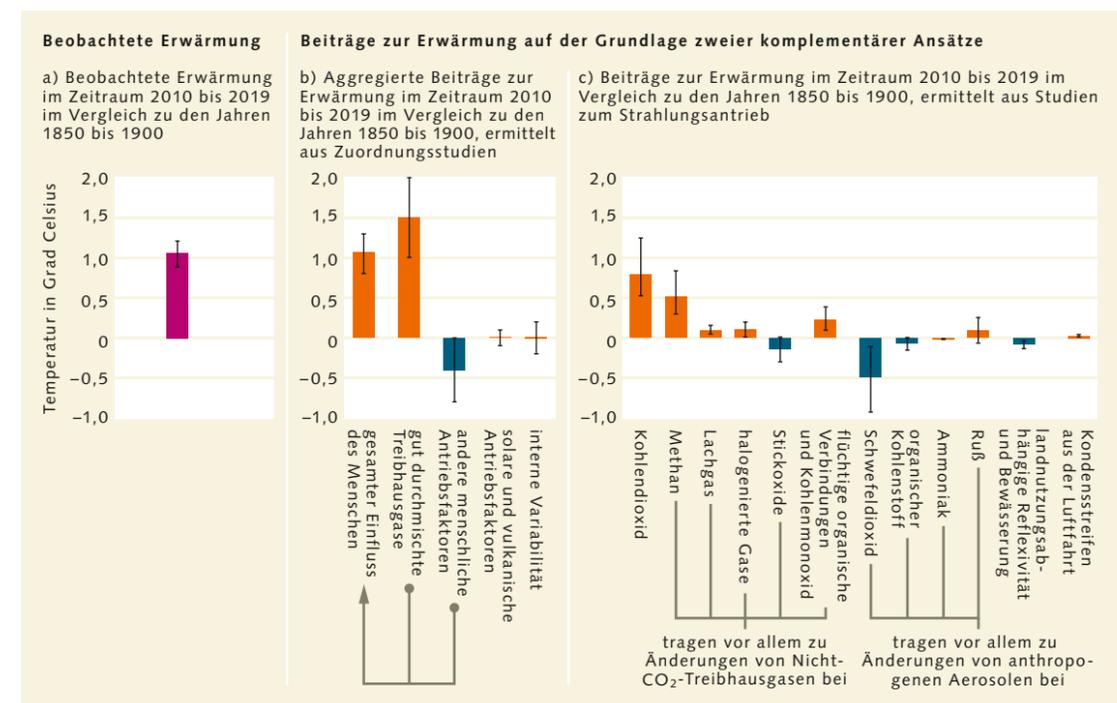
Die Konzentration der Treibhausgase in der Erdatmosphäre wird weltumspannend überwacht – etwa von Forschungseinrichtungen wie der US-amerikanischen Ozean- und Atmosphärenbehörde NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Diese veröffentlicht in jedem Jahr den sogenannten NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI), einen Treibhausgas-Index. Dieser bringt in einer Zahl zum Ausdruck, wie viel zusätzliche Wärmeenergie infolge der vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 in der Erdatmosphäre verblieben ist – und demzufolge die globale Erwärmung vorantreibt. Im Jahr 2022 stieg der NOAA-Treibhausgas-Index auf einen Wert von 1,49. Das bedeutet: Vom Menschen freigesetzte Treibhausgase hielten im Jahr 2022 sage und schreibe 49 Prozent mehr Wärmeenergie in der Erdatmosphäre gefangen als noch im Referenzjahr.

Den größten Anteil an diesem zunehmenden Wärmestau – rund 80 Prozent – hatte Kohlendioxid (chemische Formel: CO₂). Dieses Treibhausgas ist besonders langlebig. Es wird in der Atmosphäre nicht chemisch abge-

baut, sondern nur im Zuge verschiedener Prozesse (zum Beispiel CO₂-Aufnahme von Pflanzen) aus der Atmosphäre entnommen. Aus diesem Grund verbleibt Kohlendioxid mitunter bis zu 1000 Jahre lang in der Erdatmosphäre und entfaltet eine entsprechend lange Klimawirkung.

Kohlendioxid wird bei nahezu allen menschlichen Aktivitäten ausgestoßen. Es entsteht in erster Linie:

- bei der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas: Nach Angaben des Weltklimarates entstanden im Jahr 2019 rund 34 Prozent der weltweiten Kohlendioxidemissionen im Energiesektor; das Verkehrs- und Transportwesen schlug mit einem Anteil von 15 Prozent zu Buche, der Industriesektor mit 24 Prozent;
- bei der Zersetzung organischen Materials (Tier- und Pflanzenreste) aufgrund von Landnutzungsänderungen: Die Land- und Forstwirtschaft sowie anderweitige Landnutzungsänderungen verursachten im Jahr 2019 rund 22 Prozent der weltweiten Emissionen von Kohlendioxid;

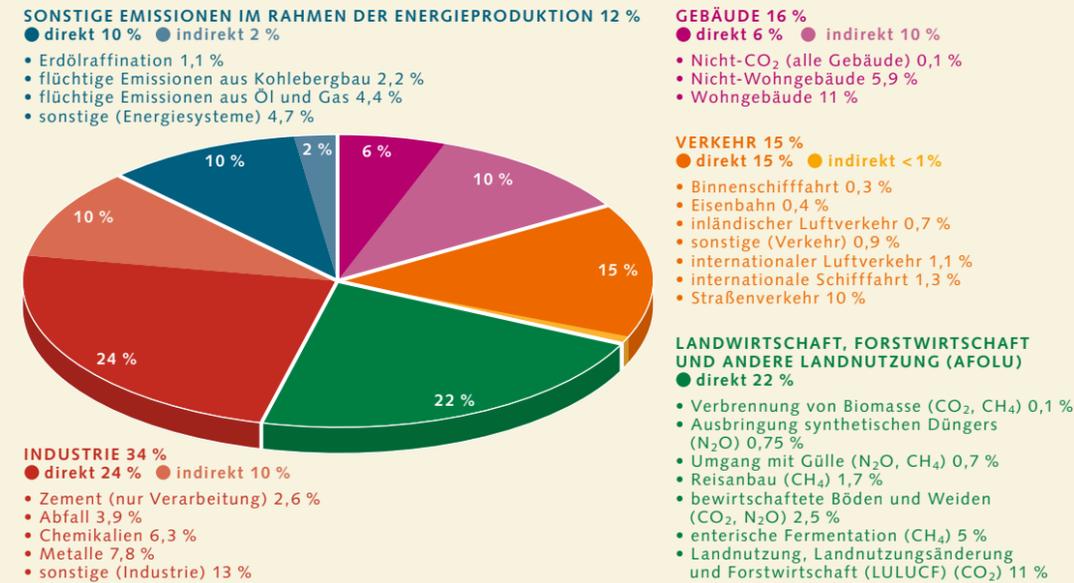


tragen vor allem zu Änderungen von Nicht-CO₂-Treibhausgasen bei

tragen vor allem zu Änderungen von anthropogenen Aerosolen bei

1.16 > Übersicht über die direkten und indirekten Treibhausgasemissionen der einzelnen Sektoren im Jahr 2019. Die Emissionen sind in Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet. Aufgrund von Rundungen ergeben die gelisteten Prozentangaben in der Summe nicht immer die vollen 100 Prozent.

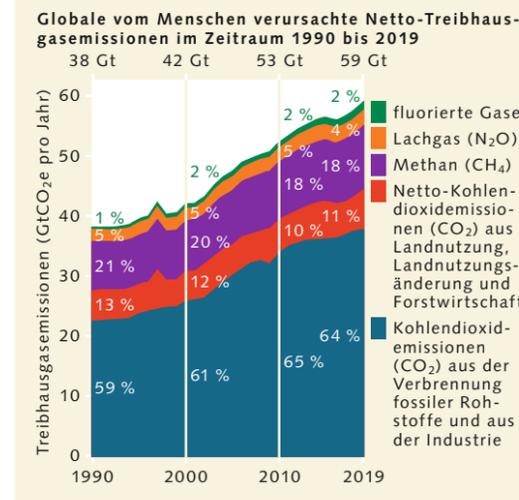
Gesamte vom Menschen verursachte direkte und indirekte Treibhausgasemissionen für das Jahr 2019 (in GtCO₂e) nach Sektoren und Teilsektoren



Direkte und indirekte Emissionen
 Direkte Emissionen stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit Aktivitäten innerhalb eines klar abgesteckten Raumes oder einer Region, eines Sektors oder Unternehmens (zum Beispiel: CO₂-Emissionen durch Ölverbrennen in der Ölheizung eines Gebäudes). Indirekte Emissionen hingegen entstehen außerhalb des definierten Raumes (Beheizen eines Gebäudes mit Fernwärme: Indirekte Emissionen entstehen bei Verbrennung im entfernt gelegenen Gas- oder Kohlekraftwerk).

- bei industriellen Prozessen wie zum Beispiel der Herstellung von Zement: Zement besteht aus Kalkstein, der bei Temperaturen von 1450 Grad Celsius gebrannt wird, um die gewünschten Materialeigenschaften zu entwickeln. Bei diesem Brennvorgang entweicht Kohlendioxid in großen Mengen aus dem Ausgangsmaterial. Allein diese prozessbedingten Emissionen der Zementproduktion machten im Jahr 2019 rund 2,6 Prozent der globalen Kohlendioxid-Gesamtemissionen aus. Unberücksichtigt blieben dabei indirekte Emissionen, wie sie u.a. bei der Energiebereitstellung sowie beim Transport entstehen. In Deutschland ist die Herstellung einer Tonne Zement mit Kohlendioxidemissionen von rund 600 Kilogramm verbunden. Etwa zwei Drittel davon entfallen auf rohstoffbedingte Prozessemissionen, ein Drittel auf Brennstoffemissionen.

Pro Jahr summieren sich die weltweiten Kohlendioxidemissionen infolge von Zementherstellung und der Verbrennung fossiler Rohstoffe mittlerweile auf rund 36 Milliarden Tonnen CO₂. Hinzu kommen die Emissionen aus der Land- und Forstwirtschaft sowie aus der veränderten Landnut-

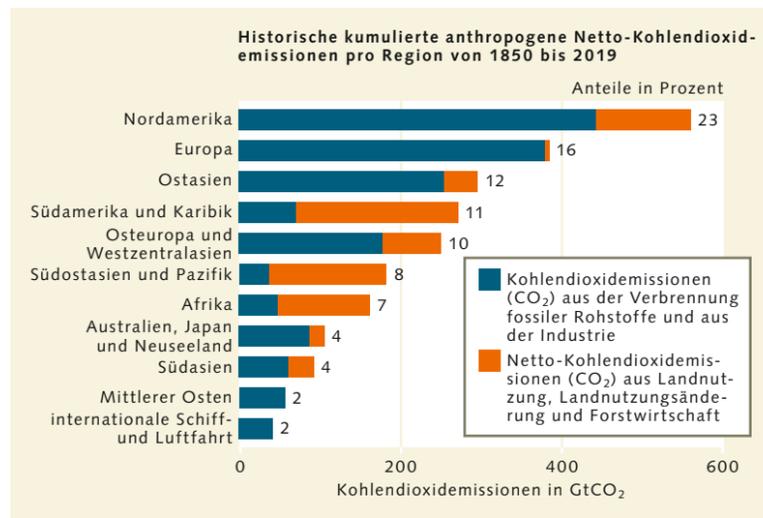
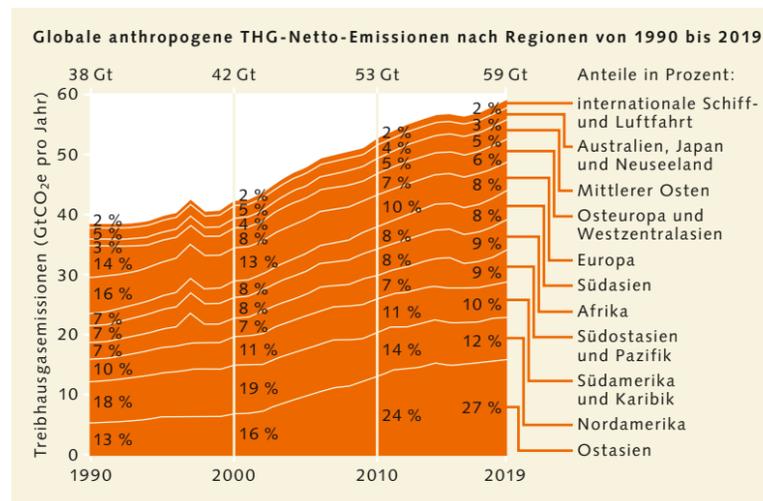


1.17 > Die Mengen aller relevanten, anthropogenen Treibhausgase ist im Zeitraum von 1990 bis 2019 stetig gestiegen.

zung in Höhe von etwa vier Milliarden Tonnen Kohlendioxid. Global betrachtet steigen die Emissionen somit seit 270 Jahren, auch wenn sich ihr Wachstum mittlerweile verlangsamt hat.



1.18 > In einem chinesischen Steinbruch wird Schotter produziert. Industrieunternehmen wie dieses verantworten zusammen mehr als ein Drittel der weltweiten Treibhausgasemissionen.



1.19 und 1.20 > Die Regionen der Welt tragen in einem sehr unterschiedlichen Maß zum Treibhausgasausstoß bei – aktuell ebenso wie in der Rückschau, bei der alle Emissionen addiert werden.

Rekordwerte – in jedem Jahr

Der stetig hohe Ausstoß führt dazu, dass die Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre kontinuierlich ansteigt. Im Mai 2023 verzeichnete die Kohlendioxid-Messstation am Mauna-Loa-Observatorium auf Hawaii erstmals einen Monatshöchstwert von 424 parts per million (ppm) – ein Plus von drei ppm im Vergleich zu Mai 2022 und die höchste bislang gemessene Kohlendioxidkonzentration der zurückliegenden zwei Millionen Jahre.

Kohlendioxid ist zweifelsohne der stärkste Motor des Klimawandels, jedoch nicht der einzige. Neben dem

langlebigen Kohlendioxid setzt die Menschheit auch zunehmend mehr kurzlebige klimawirksame Schadstoffe wie Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und fluorierte Treibhausgase frei. Diese werden im Gegensatz zu Kohlendioxid in der Atmosphäre chemisch abgebaut. Das heißt, sie bleiben in der Regel nicht länger als 20 Jahre klimawirksam. So lange sie sich aber in der Atmosphäre befinden, tragen die kurzlebigen Treibhausgase maßgeblich zum Klimawandel bei. Methan beispielsweise hält über einen Zeitraum von 20 Jahren gerechnet mehr als 80-mal mehr Wärme in der Erdatmosphäre als die gleiche Menge Kohlendioxid.

Der Weltklimarat kommt in seinem aktuellen Bericht zu dem Schluss, dass die steigenden Emissionen von Methan von 1850 bis 2019 für etwa 0,5 Grad Celsius der in dieser Zeit beobachteten globalen Erwärmung verantwortlich waren. Rechnet man die Methankonzentration und ihre Klimawirksamkeit in das entsprechende Kohlendioxid-Äquivalent um, dann machten die vom Menschen verursachten Methanemissionen im Jahr 2019 rund 18 Prozent der Gesamtemissionen aus.

Direkt gemessen wird die Methankonzentration in der Erdatmosphäre seit dem Jahr 1983. Nach Angaben der NOAA betrug die durchschnittliche Methankonzentration im Jahr 2022 genau 1911,8 parts per billion (ppb, Teile pro Milliarde). Im Jahr 1750, so belegen es Klimaarchive, waren es noch 729 ppb. Das bedeutet, die Lufthülle der Erde enthält mittlerweile 162 Prozent mehr. So hoch war die Methankonzentration in den zurückliegenden 800 000 Jahren nicht.

Methan entweicht zum einem aus natürlichen Quellen wie Mooren, Mangrovenwäldern, Salzmarschen und Seegraswiesen. Zum anderen wird es durch menschliche Aktivitäten freigesetzt, vor allem:

- *in der Landwirtschaft:* Verdauungsprozesse von Wiederkäuern, Reisanbau, Umgang mit Wirtschaftsdünger, Gülle und Gärresten;
- *im Energiesektor:* Kohleförderung, Erdöl- und Erdgasförderung und -transport, Verbrennen von Biomasse und Biotreibstoffen sowie
- *in der Abfall- und Abwasserwirtschaft:* Entweichen aus Müllhalden, Abwässern und Klärschlamm.

Diese vom Menschen zu verantwortenden Methanemissionen lassen sich mit verhältnismäßig wenig Aufwand reduzieren. Da atmosphärisches Methan zudem in einem Zeitraum von etwa neun bis zwölf Jahren chemisch abgebaut wird und somit seine Klimawirkung verliert, gelten Lösungen zur Eindämmung der Methanfreisetzung als besonders vielversprechende Maßnahmen im Kampf gegen den Klimawandel. Neuerer Forschung zufolge ließen sich zum Beispiel bis zum Jahr 2050 etwa 0,25 Grad Celsius zusätzliche Erwärmung verhindern, wenn die Menschheit ab sofort alle bekannten Optionen zur Eindämmung selbst verursachter Methanemissionen umsetzen würde.

Wann überschreitet die globale Erwärmung das 1,5-Grad-Ziel?

Jede zusätzliche Tonne freigesetzter Treibhausgase treibt die Erderwärmung weiter voran. Diesen fast linearen

Zusammenhang kann die Wissenschaft zumindest für Kohlendioxid mittlerweile sehr gut belegen. So weiß man inzwischen, dass Kohlendioxidemissionen in Höhe von 1000 Milliarden Tonnen (tausend Gigatonnen) die globale Oberflächentemperatur um weitere 0,27 bis 0,63 Grad Celsius steigen lassen – und zwar jedes Mal, wenn sich eine solche Menge Kohlendioxid neu in der Atmosphäre anreichert.

Viel häufiger aber geht es in der Klimawandel-Debatte um die Frage, wann ein bestimmtes Erwärmungsniveau erreicht wird. Das Pariser Klimaabkommen aus dem Jahr 2015 zum Beispiel erklärt eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf weit unter zwei Grad Celsius als Ziel, nach Möglichkeit auf 1,5 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit. Die Schwierigkeit dabei ist jedoch, dass das Abkommen weder nähere Angaben dazu macht, wie die spezifischen Erwärmungsniveaus definiert sind, noch, welcher Zeitraum mit dem Wort „vorindustriell“ gemeint ist.

Kohlendioxid-Äquivalent

Um die Wirkung verschiedener Treibhausgase vergleichen zu können, berechnen Forschende, wie viel Kohlendioxid man bräuhete, um über einen bestimmten Zeitraum denselben Effekt auf einen ausgewählten Klimaparameter zu erzeugen wie mit einer gegebenen Menge Methan, Lachgas oder einem Mix anderer Treibhausgase. Diese errechnete Menge CO₂ wird dann als Kohlendioxid-Äquivalent bezeichnet.



1.21 > Bauern in der pakistanischen Provinz Sindh treiben ihre Ziegen über geflutetes Gelände. Starkregen und Sturzfluten setzten im Juli und August 2022 große Teile Pakistans unter Wasser und richteten in der Hälfte aller Provinzen schwere Schäden an.

1.22 > Der Klimawandel ließe sich wirkungsvoll eindämmen, wenn es der Menschheit gelänge, ihren Methanausstoß zu reduzieren. Wie, ist hinlänglich bekannt. Die Lösungsansätze müssten nur flächendeckend umgesetzt werden.

Sektor	Ausgewählte Maßnahmen zur Reduktion von Menschen verursachter Methanemissionen
Landwirtschaft: Tierhaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz eines vorbehandelten, leichter verdaulichen Tierfutters • Verfüttern von Meeresalgen und anderer emissionsreduzierender Zusatzstoffe • verbessertes Herdenmanagement • verbesserter Umgang mit Gülle (z.B. Abdeckung) • Einführung anaerober Vergärungsanlagen für Rinder- und Schweinegülle • Verwendung der Gülle in Biogasanlagen • Zucht von Nutztieren, die weniger Methan produzieren • Verhaltensänderung: weitgehender Verzicht auf Fleisch und Umstellung auf pflanzenbasierte Ernährung
Landwirtschaft, insbesondere Reisanbau	<ul style="list-style-type: none"> • verbesserte Bewässerungs- und Anbautechniken, u.a. Reisfelder regelmäßig fluten und auch wieder trockenfallen lassen • Nutzung neuer Reissorten • Maßnahmen zur Bodenverbesserung • Verhaltensänderung: Reduktion der Lebensmittelabfälle
Erdöl-, Erdgas- und Kohleförderung	<ul style="list-style-type: none"> • Rückgewinnung und Nutzung von entweichendem Gas • Schließung von Methanleckagen an aktiven Bohrlöchern und Pipelines • Vermeiden von Methanleckagen beim Öl- und Gastransport • Verschließen nicht mehr genutzter Bohrlöcher • Einsatz moderner Pumpen- und Fördertechnik • Flutung stillgelegter Kohlebergwerke • Stopp der Nutzung und Förderung fossiler Brennstoffe
Abfall- und Abwasserwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • keine Deponierung organischer Abfälle, stattdessen Verwertung derer in Biogasanlagen • Rückgewinnung von Deponiegasen und deren direkte Nutzung für die Energieproduktion • Recycling industrieller und kommunaler Abfälle • Umstellung von offener Kanalisation auf aerobe Abwasserbehandlung • Umstellung der Behandlung häuslicher Abwässer auf anaerobe Behandlung mit Biogasrückgewinnung und -verwertung • Umstellung der Behandlung von Industrieabwässern und Klärschlämmen auf einen zweistufigen Prozess – anaerobe Behandlung mit Biogasrückgewinnung, gefolgt von aerober Behandlung

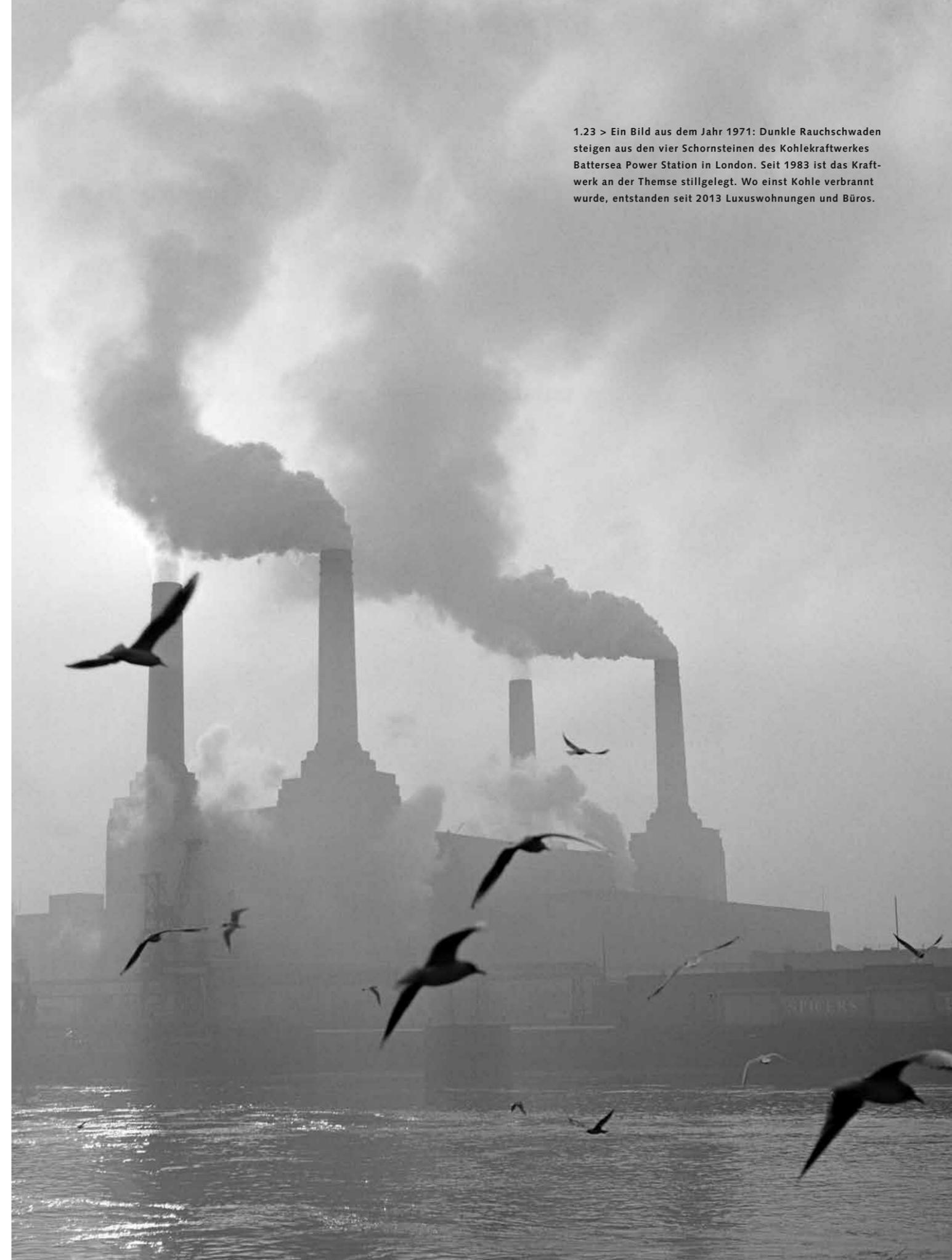
Die Klimaforschenden haben sich deshalb auf eine gemeinsame Ausgangsbasis geeinigt. Sie definieren die Erwärmungsniveaus im Vergleich zum Zeitraum von 1850 bis 1900 – im vollen Bewusstsein, dass die Industrialisierung bereits 100 Jahre früher begonnen hat und damals die Kohlendioxidemissionen bereits rapide angestiegen waren, vor allem in Großbritannien. Allerdings reichen die Daten zur globalen Oberflächentemperatur der Erde nur bis zum Jahr 1850 in zufriedenstellender Qualität zurück. Daher entschieden sich die Forschenden für die Vergleichsperiode von 1850 bis 1900.

Bei einer Antwort auf die Frage, wann die globale Erwärmung eine bestimmte Temperaturgrenze überschreitet, muss zudem bedacht werden, dass die Erwärmung stets als Durchschnittswert für einen Zeitraum von 20 Jahren berechnet wird. Das heißt aus Sicht der Klima-

forschung: Die 1,5-Grad-Grenze ist erreicht, wenn über einen Zeitraum von 20 Jahren die durchschnittliche Oberflächentemperatur 1,5 Grad Celsius über dem Durchschnittswert des Vergleichszeitraumes 1850 bis 1900 gelegen hat. Wann genau aber wird das sein?

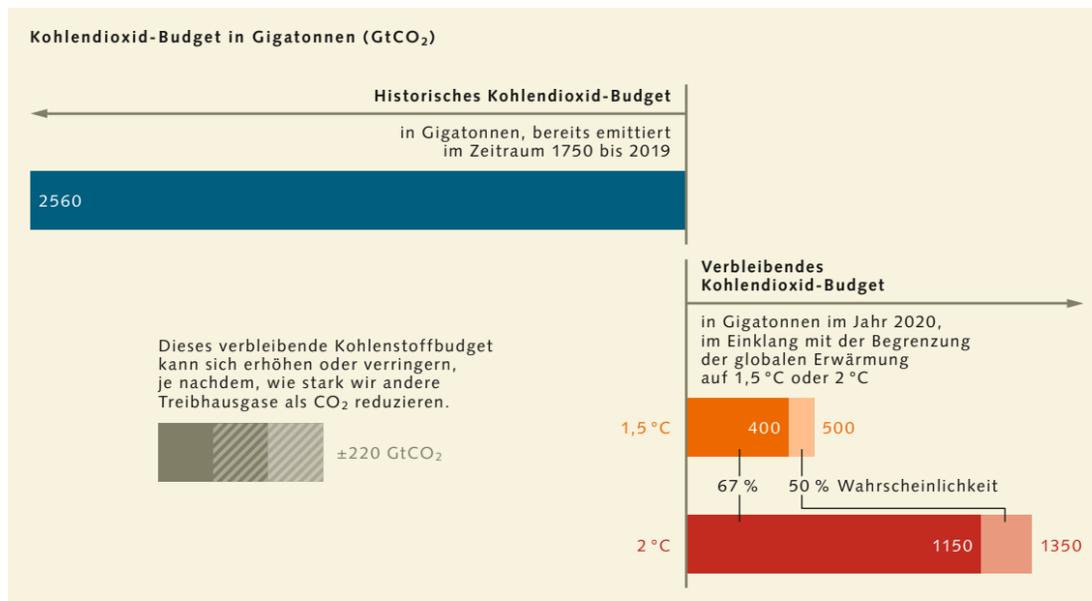
Die genaue Temperaturentwicklung vorherzusagen, ist noch immer schwierig, weil die Höhe der künftigen Erwärmung von vier Faktoren abhängt: von der Menge künftiger Treibhausgasemissionen, von der internen Variabilität des Klimasystems (gemeint sind die natürlichen Schwankungen), von der Klimasensitivität sowie von den Unsicherheiten in der Bestimmung des Temperaturniveaus für den Referenzzeitraum 1850 bis 1900.

Als Klimasensitivität bezeichnen Forschende die langfristige Klimaerwärmung, ausgelöst durch eine plötzliche Verdopplung der Konzentration von Kohlendioxid in der



1.23 > Ein Bild aus dem Jahr 1971: Dunkle Rauchschwaden steigen aus den vier Schornsteinen des Kohlekraftwerkes Battersea Power Station in London. Seit 1983 ist das Kraftwerk an der Themse stillgelegt. Wo einst Kohle verbrannt wurde, entstanden seit 2013 Luxuswohnungen und Büros.

1.24 > Da Kohlendioxid sich in der Atmosphäre anreichert, können Forschende berechnen, welche Mengen noch freigesetzt werden dürfen, bis ein bestimmtes Erwärmungsniveau erreicht ist. Im Jahr 2020 waren es noch 400 Gigatonnen Kohlendioxid, wenn die Welt das 1,5-Grad-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 Prozent erreichen möchte.



Erdatmosphäre. Ihr Wert liegt nach aktuellen Angaben des Weltklimarates mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit zwischen zwei und fünf Grad Celsius, wobei jedoch mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte vergehen können, bis sich diese Erwärmung einstellt und das Klimasystem nach der Störung (Verdopplung der Kohlendioxidkonzentration) wieder in einen Gleichgewichtszustand zurückfindet.

Klimamodelle kommen aufgrund dieser Spanne von drei Grad Celsius zu verschiedenen Ergebnissen: Verwenden Forschende in ihren Klimamodellierungen eine mittlere Klimasensitivität, deuten Berechnungen auf Basis der fünf sogenannten Sozioökonomischen Entwicklungspfade (Shared Socioeconomic Pathways) darauf hin, dass das 20-Jahres-Temperaturmittel im Zeitraum von 2020 bis 2039 auf jeden Fall die 1,5-Grad-Grenze erreichen wird – ganz ungeachtet dessen, welche Treibhausgasemissionen die Menschheit in den kommenden Jahren freisetzen wird. Bleiben die Emissionen auf ihrem aktuell hohen Niveau oder steigen sie weiter, wird die globale Erwärmung bis zum Jahr 2050 sogar die Zwei-Grad-Grenze überschreiten.

Wie viel Zeit noch bleibt, den Klimawandel einzudämmen, lässt sich aber auch in Form sogenannter Kohlendioxid-Budgets beantworten, welche die Menschheit noch emittieren darf, bis ein bestimmtes Erwärmungsniveau

erreicht ist. Die entsprechenden Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass die globale Oberflächentemperatur um etwa 0,45 Grad Celsius (0,23 bis 0,65 Grad Celsius) ansteigt, wann immer die Menschheit weitere 1000 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre freisetzt. Berücksichtigt werden außerdem die bisherige Erwärmung, der Anteil anderer Treibhausgase als Kohlendioxid an der künftigen Erwärmung sowie die Frage, wie lange die Erwärmung noch voranschreiten würde, wenn es der Menschheit gelänge, ihre Kohlendioxidemissionen eines Tages auf null zu reduzieren.

Im Zeitraum von 1750 bis 2019 hat die Menschheit etwa 2560 Milliarden Tonnen Kohlendioxid emittiert. Zieht der Weltklimarat alle methodischen Unsicherheiten mit in Betracht, reicht diese Treibhausgasmenge seiner Ansicht nach vermutlich schon aus, um die 1,5-Grad-Marke zu erreichen. Das bedeutet: Das verbleibende Kohlendioxid-Budget betrüge null – wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit, so die Experten. Verwenden die Fachleute bei ihren Berechnungen jedoch sogenannte „beste Schätzungen“ für die wichtigsten Parameter, fallen die verbleibenden Kohlendioxid-Budgets größer als null aus.

Klein sind sie dennoch, wie die Ergebnisse zeigen: Will die Menschheit die globale Erwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 Prozent auf 1,5 Grad Celsius

beschränken, darf sie, seit dem 1. Januar 2020 gerechnet, nur noch 400 Milliarden Tonnen Kohlendioxid freisetzen. Das entspricht in etwa jener Menge Kohlendioxid, welche die Staatengemeinschaft im zurückliegenden Jahrzehnt (2010 bis 2019) emittiert hat. Das Guthaben bis zum Zwei-Grad-Ziel beträgt 1150 Milliarden Tonnen. Angesichts aktueller Emissionen von rund 40 Milliarden Tonnen pro Jahr wären beide Budgets bei gleichbleibenden Emissionen bis zum Jahr 2030 beziehungsweise bis 2050 aufgebraucht.

Wie wenig Spielraum uns Menschen noch bleibt, zeigt auch die folgende Statistik: Würde die Menschheit alle im Jahr 2018 bereits in Betrieb befindlichen fossilen Infrastrukturen – also Kohle- und Erdgaskraftwerke, Erdölraffinerien, Hochöfen, Motoren etc. – bis zum Ende ihrer jeweiligen Lebenszeit in gleicher Auslastung weiterlaufen lassen wie bisher, würden in den kommenden Jahrzehnten zusätzliche 660 Milliarden Tonnen Kohlendioxid freigesetzt. Erweitert man diese Rechnung dann auch auf alle im Jahr 2018 geplanten oder im Bau befindlichen Anlagen, kämen noch einmal 187 Milliarden Tonnen Kohlendioxid hinzu. Eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf unter zwei Grad Celsius wäre unter diesen Bedingungen ernsthaft in Gefahr. Ein Verbot neuer Kohle- oder Erdgaskraftwerke wäre somit ein wichtiger Schritt, zukünftige Emissionen zu vermeiden.

Das große Ziel: Treibhausgasneutralität

Die globale Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten auf 1,5 Grad zu begrenzen, ist mittlerweile kaum noch möglich – zumindest nicht, ohne dabei für einige Jahrzehnte über das Temperaturziel hinauszuschießen (Überschuss-Szenario). Mit großen Anstrengungen aber kann es gelingen, die globale Erwärmung auf unter zwei Grad Celsius zu beschränken. Benötigt werden dazu eine sofortige, tiefgreifende Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen sowie das Erreichen einer sogenannten Netto-Null der Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2050.

Ideen für weitreichende Emissionseinsparungen gibt es für jeden Sektor. Nach Angaben des Weltklimarates ist es auf Grundlage vorhandener Lösungsoptionen möglich, die globalen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 zu halbieren. Mehr als die Hälfte dieses Einsparpo-

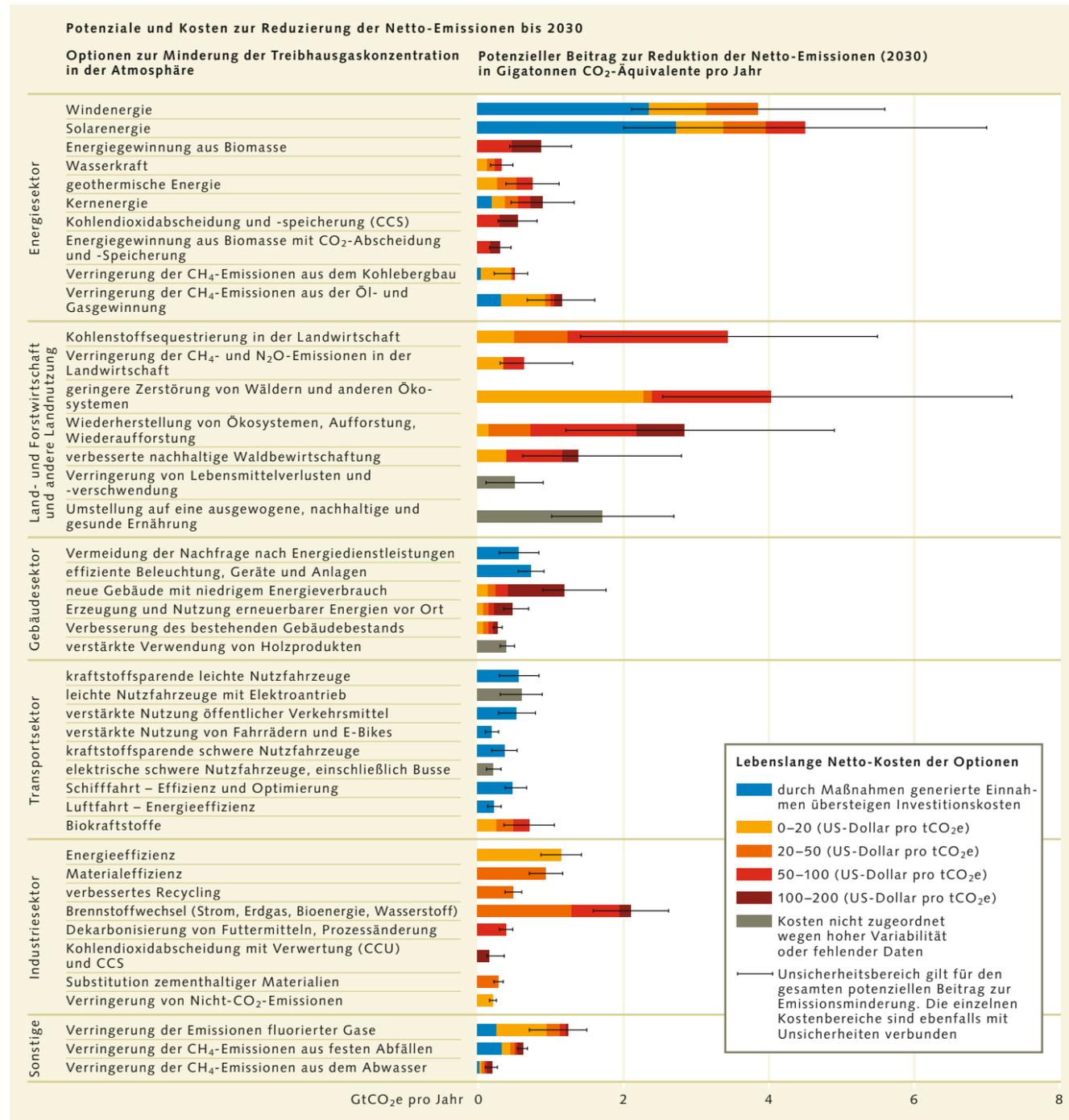
tenzials ließe sich dabei mit Maßnahmen realisieren, deren Kosten sich auf weniger als 20 US-Dollar pro eingesparter Tonne Kohlendioxid belaufen – ein Fakt, der vor allem für ärmere Länder besonders wichtig ist. Beispiele wären der weltweite Ausbau von Windkraft- und Fotovoltaikanlagen zur Gewinnung von Strom aus erneuerbaren Quellen, ein Ende der Waldrodungen und Trockenlegung von Feuchtgebieten, verbesserte Kohlenstoff-Speicherkapazitäten vieler Äcker und Felder durch eine nachhaltige und bodenschonende Landwirtschaft, ein weitgehender Verzicht auf Fleisch, der Bau energieeffizienter Gebäude, der Einsatz alternativer Treibstoffe in der Industrie sowie Maßnahmen zur Eindämmung von Emissionen von Methan.

Ein durchaus realisierbares Programm, könnte man meinen. Tatsächlich aber erfordert eine erfolgreiche Umsetzung einen umfassenden strukturellen und gesellschaftlichen Wandel, einen Umbau und ein Umdenken auf allen Ebenen, einschließlich neuer Vorstellungen darüber, was der Mensch zum Leben braucht (und konsumieren muss) und was nicht. Hinzu kommt: Eine Halbierung der Emissionen wäre nur der erste Schritt.

Im Anschluss müsste der Treibhausgasausstoß so weit reduziert werden, dass schnellstmöglich eine Treibhausgasneutralität erreicht würde. Sowohl der Begriff Treibhausgasneutralität als auch die synonym verwandte Bezeichnung Netto-Null der Treibhausgasemissionen beschreiben eine Welt, in der die Menschheit oder auch vereinzelte Akteure wie Staaten und Unternehmen nur noch so viel Treibhausgase freisetzen, wie sie der Erdatmosphäre auch wieder entnehmen können. Fachleute unterscheiden dabei bewusst zwischen den Begriffen Kohlendioxidneutralität (Netto-Null der Kohlendioxidemissionen) und Treibhausgasneutralität (Netto-Null aller Treibhausgasemissionen, einschließlich Kohlendioxid). Der Grund: Klimaphysikalisch betrachtet, ließe sich die globale Oberflächentemperatur stabilisieren, wenn die Menschheit nur noch so viel Kohlendioxid freisetzen würde, wie sie der Atmosphäre auch wieder entnehmen kann, und sie gleichzeitig die Freisetzung kurzlebiger Luftschadstoffe wie Methan und Lachgas auf ein bestimmtes Maß reduzieren würde. Gelänge es ihr dagegen, alle Treibhausgasemissionen auf Netto-Null zu reduzieren, würde die globale Temperatur langfristig

Überschuss-Szenario
Als Überschuss-Szenario wird eine Entwicklung bezeichnet, in der die globale Oberflächentemperatur zunächst für einen Zeitraum von einem Jahrzehnt bis mehreren Jahrzehnten über ein definiertes Klimaziel (zum Beispiel 1,5-Grad-Ziel) hinausschießt, im Anschluss aber wieder unter die gesetzte Temperaturgrenze fällt. Letzteres gelingt allerdings nur, wenn die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre tatsächlich sinkt, weil ihr Kohlendioxid entnommen wurde.

Pariser Klimaabkommen
Das Pariser Klimaabkommen wurde am 12. Dezember 2015 auf der 21. Klimakonferenz in Paris verabschiedet und trat am 4. November 2016 in Kraft. Bis September 2022 hatten 194 Staaten und die Europäische Union das Abkommen unterzeichnet und ratifiziert.



1.25 > Für alle Bereiche des Lebens gibt es mittlerweile Ansätze, mit denen sich der Treibhausgasausstoß der Menschheit bis zum Jahr 2030 wirksam verringern ließe. Diese Abbildung des Weltklimarates listet die wirksamsten Maßnahmen auf und zeigt, zu welchem Preis die Einsparungen möglich wären. Wichtig dabei: In Einsparungen zu investieren, kostet deutlich weniger, als die Folgen des fortschreitenden Klimawandels zu beheben.

sogar leicht sinken. Eine Netto-Null der Kohlendioxid-emissionen ist somit die große Grundvoraussetzung für ein Ende der globalen Erwärmung. Mithilfe einer Netto-Null aller Treibhausgasemissionen hingegen würde es sogar gelingen, die Erderwärmung ein kleines Stück zurückzuschrauben.

Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme

Die für eine Kohlendioxid-Entnahme infrage kommenden Methoden werden von Fachleuten unter dem Stichwort Carbon Dioxide Removal (CDR, Kohlendioxid-Entnahme) diskutiert und erforscht. Es gibt zwar auch erste Ideen zur Entnahme von Methan. Eine wissenschaftliche Beurteilung ihres Machbarkeitspotenzials ist aber aufgrund fehlender Forschung zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht möglich.

Die Bezeichnung CDR umfasst ein ganzes Paket an Verfahren, mit denen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnommen und anschließend dauerhaft eingelagert werden kann. Als Speicherstätten kommen dabei sowohl der tiefe geologische Untergrund infrage als auch die Ozeane sowie Lagerstätten an Land, hier insbesondere Böden und Vegetation. Eine vierte Option wäre, das entnommene Kohlendioxid für die Herstellung von Produkten aus Kohlenstoff zu nutzen.

Kohlendioxid-Entnahme: Ein Ausgleich für schwer vermeidbare Restemissionen

Klimaforschende gehen davon aus, dass die Staatengemeinschaft selbst bei sehr ambitionierter Klimapolitik auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch mehrere Milliarden Tonnen Treibhausgas-Restmengen (Kohlendioxid, Methan, Lachgas) emittieren wird. Diese schwer vermeidbaren Restemissionen werden zum Beispiel bei der Zement- und Stahlherstellung, im Flug- und Schwerlasttransport, aber auch in der Landwirtschaft und bei der Müllverbrennung entstehen.

Um Treibhausgasneutralität zu erreichen, müssen diese Restemissionen durch Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme ausgeglichen werden. Dafür gibt es verschiedene Lösungsideen, die entweder auf den Ausbau der natürlichen Kohlenstoffsinken setzen oder aber technologische

Ansätze darstellen. Fachleute ordnen die vielen CDR-Methoden vier Kategorien zu:

- eine Verstärkung der biologischen Kohlendioxidsinken an Land, zum Beispiel durch Wiederaufforstung,
- eine Verstärkung der biologischen Kohlendioxidsinken im Meer, zum Beispiel durch die Wiederherstellung geschädigter oder abgestorbener Mangrovenwälder und Seegraswiesen,
- geochemische Verfahren sowie
- chemische Methoden.

Wichtig ist dabei: Es zählen nur Methoden, bei denen Handlungen des Menschen zu einer verstärkten Kohlendioxidaufnahme aus der Atmosphäre führen. Bäume, die sich auf natürliche Weise irgendwo ansiedeln, Fotosynthese betreiben und Kohlendioxid aufnehmen und binden, dürfen nicht mit in die CDR-Bilanz aufgenommen werden. Die offizielle CDR-Definition des Weltklimarates ist sogar so eng gefasst, dass Ansätze, bei denen Kohlendioxid aus fossilen Quellen an der Emissionsquelle aufgefangen und im Anschluss im Untergrund gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS) oder aber zu Produkten verarbeitet wird (Carbon Capture and Utilisation, CCU), nicht als CDR bezeichnet werden dürfen. Im Zuge dieser wird Kohlendioxid nämlich nicht aus der Atmosphäre entnommen, sondern nur sein Entweichen in dieselbige verhindert.

Einige CDR-Methoden wendet der Mensch seit Jahrhunderten an, wenn auch nicht mit dem Ziel, Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen. Dazu gehören das Wiederaufforsten abgeholzter Waldflächen, eine nachhaltige Bewirtschaftung bestehender Waldflächen, der Schutz von Mooren und Feuchtgebieten sowie regenerative Formen der Landwirtschaft, die dazu führen, dass der Humus- oder Kohlenstoffgehalt des Bodens steigt, indem der Atmosphäre Kohlendioxid und andere klimaschädliche kohlenstoffhaltige Verbindungen entzogen und meist in Form von organischem Material (Pflanzenreste, Mist etc.) im Boden eingelagert werden. Zu den bekanntesten Verfahren der Kohlenstoffanreicherung im Boden zählen zum Beispiel der Anbau mehrjähriger Gräser und Leguminosen, verbesserte Fruchtfolgen einschließlich des Anbaus von Zwischenfrüchten, der Eintrag von Kompost und Mist sowie eine reduzierte Bodenbearbeitung.

CDR-Definition des Weltklimarates
Als Kohlendioxid-Entnahmeverfahren dürfen nur jene Verfahren bezeichnet werden, bei denen das entnommene Kohlendioxid aus der Atmosphäre stammt, seine anschließende Speicherung dauerhaft erfolgt und die Entnahme ein Resultat menschlichen Handelns ist und demzufolge zusätzlich zu den natürlichen Kohlendioxid-Aufnahmeprozessen der Erde erfolgt ist.

Aufforstung und Wiederaufforstung
Als „Aufforstung“ bezeichnet der Weltklimarat das Pflanzen von Bäumen auf einem Areal, welches in der Vergangenheit nicht bewaldet war. Man könnte also auch von „Bewaldung“ sprechen. „Wiederaufforstung“ hingegen meint das Pflanzen junger Bäume in einem Gebiet, dessen einstiger Waldbewuchs durch Rodungen, Feuer oder andere menschliche Aktivitäten zerstört worden ist.

Andere CDR-Methoden hingegen sind vergleichsweise neu und dienen einzig und allein dem Ziel, die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre zu senken. Gemeint sind Methoden wie das Abscheiden von Kohlendioxid aus der Luft und seine anschließende Einlagerung (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) oder aber die Erzeugung von Bioenergie mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -einlagerung (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS). Die Erfahrungen mit und das Wissen über diese Ansätze nehmen zwar zu, noch aber werden sie in einem vergleichsweise kleinen Maßstab eingesetzt.

Des Weiteren unterscheiden sich CDR-Methoden darin, für wie lange das Kohlendioxid der Atmosphäre entzogen wird. Der mögliche Zeitraum reicht von einigen Jahrzehnten bis zu Jahrmillionen und hängt unmittelbar vom Speicherort ab. Kohlendioxid, das vom Meer aufgenommen oder aber in tief liegenden Gesteinsschichten eingelagert wird, verbleibt dort meist über längere Zeiträume als Kohlendioxid, welches von Wäldern an Land

sequestriert wird. Natürliche Speicherstätten an Land sind zudem störungsanfälliger. Feuchtgebiete beispielsweise können trockenfallen, Wälder abbrennen. Im Zuge beider Prozesse würde das Kohlendioxid wieder freigesetzt werden und in die Atmosphäre entweichen. Etwas geringer fällt das Freisetzungsrisko aus, wenn Bäume gefällt und als langlebiges Bauholz (zum Beispiel als Dachstuhl) verwendet werden oder aber wenn aus abgeschiedenem Kohlendioxid Produkte mit langer Lebensdauer hergestellt werden.

Zu guter Letzt unterscheiden sich die verschiedenen CDR-Methoden darin, in welchem Größenmaßstab sie angewendet werden können, wie viel Kohlendioxid der Atmosphäre mit ihrer Hilfe entnommen werden kann, welche möglichen Risiken und Vorteile ein Einsatz mit sich brächte, welche Kosten im Falle eines großflächigen Einsatzes entstünden und ob die dazu benötigte Technik überhaupt schon entwickelt und einsatzbereit ist. Antworten auf diese und viele andere Fragen sucht die Wissenschaft derzeit in verschiedenen Forschungsprojekten.



1.26 > Auf Island gelingt es bereits in sehr kleinem Maßstab, Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen und im Untergrund einzulagern. Dazu wird das abgeschiedene Gas in Frischwasser gelöst und in das vulkanisch-warme Basaltgestein eingeleitet. Dessen Bestandteile reagieren chemisch mit dem Kohlendioxid, sodass es mineralisiert – das heißt, selbst zu Gestein wird.

Klimaziele: Fortschritte im Schneckentempo

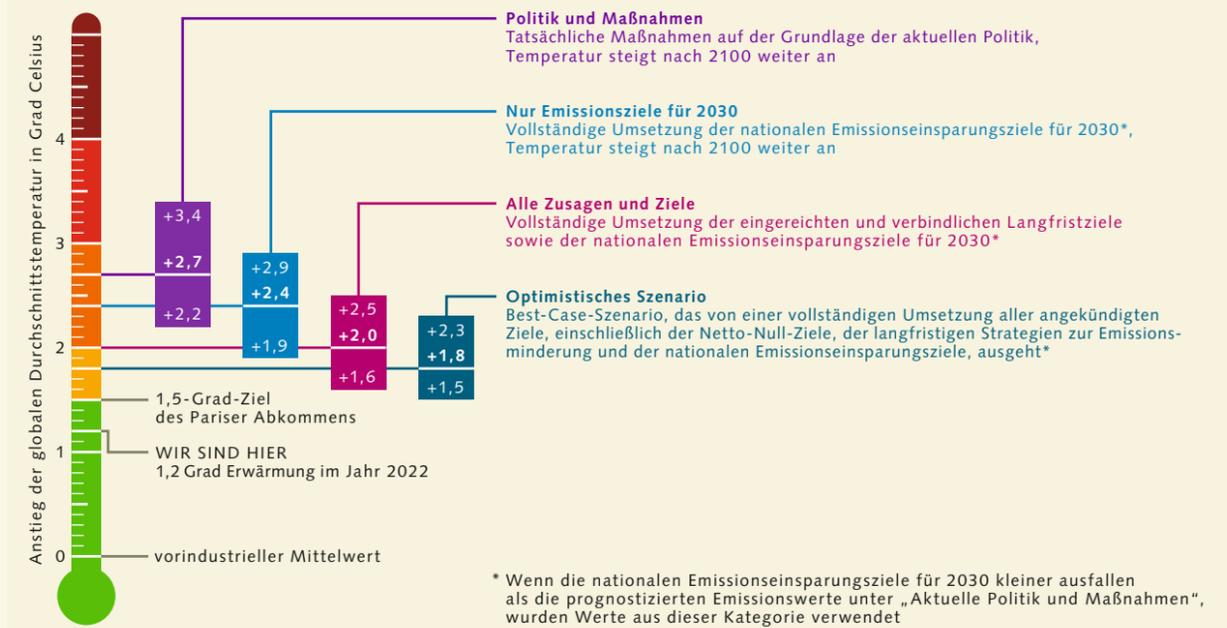
Im Pariser Klimaabkommen haben sich alle Unterzeichnerstaaten dazu verpflichtet, die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius zu begrenzen. Voraussetzung dafür ist eine Netto-Null der Treibhausgasemissionen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Um dieses Ziel zu erreichen, sind alle Staaten aufgefordert, eine nationale Klima-Langfriststrategie zu entwickeln sowie alle fünf Jahre nationale Emissionseinsparungsziele (Nationally Determined Contributions, NDCs) festzulegen und zu veröffentlichen.

Mehr als 140 Staaten sind dieser Aufgabe bereits nachgekommen. Die Bundesrepublik Deutschland beispielsweise hat sich dazu verpflichtet, bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral zu sein. Den Weg dorthin ebnet das im Juni 2021 novellierte Klimaschutzgesetz, welches der Energiewirtschaft, der Industrie, der Landwirtschaft, dem Verkehrswesen und dem Gebäudebereich verbindliche Emissionsobergrenzen vorschreibt. Bis zum Jahr 2030, so der Plan, sollen die deutschen Treib-

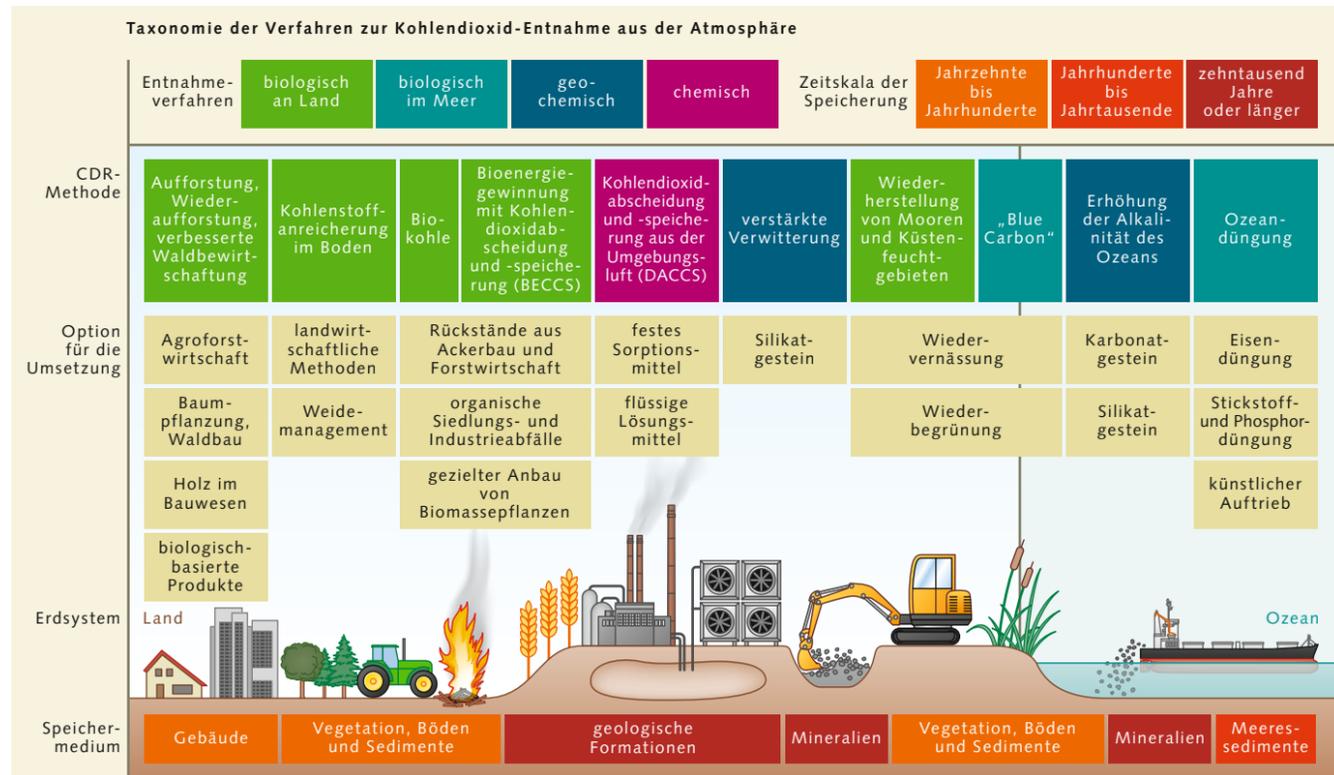
hausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 bereits um 65 Prozent gesunken sein.

In der Umsetzung der selbst gesteckten Klimaschutzziele aber hinken Deutschland und viele andere Staaten den eigenen politischen Vorgaben hinterher. Fortschritte im Kampf gegen den Klimawandel gibt es weltweit weiterhin nur im Schneckentempo. Auf Grundlage aktuell geltender Klimaschutz-Gesetze und -Maßnahmenkataloge sagen Fachleute eine globale Erwärmung von zwei bis 3,6 Grad Celsius bis zum Jahr 2100 vorher. Mehr Einsatz, politischer Wille und Investitionen in den Klimaschutz sind deshalb vonnöten. Im Jahr 2022 waren nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) fast 89 Prozent der rekordverdächtig hohen globalen Kohlendioxidemissionen im Energiesektor auf die Verbrennung fossiler Rohstoffe und die dazugehörigen Industrieprozesse (Förderung, Verarbeitung) zurückzuführen. Die Menschheit steckt demzufolge noch immer tief im fossilen Zeitalter fest.

Globaler Temperaturanstieg bis zum Jahr 2100, berechnet von Fachleuten des Climate Action Tracker (Stand: November 2022)



1.27 > Fachleute des Climate Action Tracker analysieren regelmäßig die internationale Klimapolitik und berechnen auf Grundlage der getroffenen und versprochenen Klimaschutzmaßnahmen aller Staaten, auf welche Erwärmung die Erde bis zum Jahr 2100 zusteuert. Im November 2022 deuteten die bis dato umgesetzten Maßnahmen auf eine Erwärmung von 2,2 bis 3,4 Grad Celsius hin.



1.28 > Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre könnten sowohl an Land als auch im Meer eingesetzt werden. Dieses Schaubild zeigt die verschiedenen Ansätze, gegliedert nach Art der Entnahme und nach anschließendem Speichermedium.

Kein Ersatz für umfassende Emissionseinsparungen

Angesichts des enormen Tempos, mit dem sich das Klima der Erde mittlerweile verändert, stellt sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht mehr die Frage, ob die Menschheit der Erdatmosphäre Kohlendioxid entnehmen muss, um die globale Erwärmung auf ein für Mensch und Natur erträgliches Minimum zu begrenzen. Die einhellige Antwort darauf lautet Ja! Ungeklärt sind dagegen die Fragen, wie, in welchem Umfang, mit welchen Zielen und unter welchen Rahmenbedingungen die Entnahme erfolgen soll und kann.

Fest steht: Wenn die Menschheit das Pariser Klimaziel erreichen will, dürfen Maßnahmen zur Kohlendioxid-Entnahme niemals als Ersatz für tiefgreifende Emissionsreduktionen dienen. Dafür sei die Menge der einzusparenden Treibhausgasemissionen viel zu groß, sagt der Weltklimarat. Denkbar sei der Einsatz von CDR-Methoden vor allem, um schwer vermeidbare Emissionen auszuglei-

chen. In naher Zukunft ließen sich so die vom Menschen verursachten Netto-Emissionen schneller reduzieren. Langfristig würde CDR der Menschheit helfen, sowohl unvermeidbare Kohlendioxid-Restemissionen auszugleichen als auch die Restemissionen anderer Treibhausgase. Im besten Fall gelänge es eines Tages, sogenannte netto-negative Emissionen zu erzielen. Das heißt, man würde der Atmosphäre mehr Kohlendioxid entnehmen, als an Äquivalenten freigesetzt wird. Als Folge dessen würden die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre und im zweiten Schritt auch die globale Oberflächentemperatur sinken.

Der erste Meilenstein auf diesem Weg aber wäre das Erreichen der Netto-Null-Kohlendioxidemissionen. Das Ziel einer umfassenden Treibhausgasneutralität würde etwa zehn bis 40 Jahre oder aber viel später folgen – abhängig von der Menge der restlichen Treibhausgasemissionen (Methan, Lachgas etc.), die durch die Kohlendioxid-Entnahme ausgeglichen werden müsste.

Für eine globale Netto-Null der Kohlendioxidemissionen müssten auch nicht alle Länder ihre Restemissionen

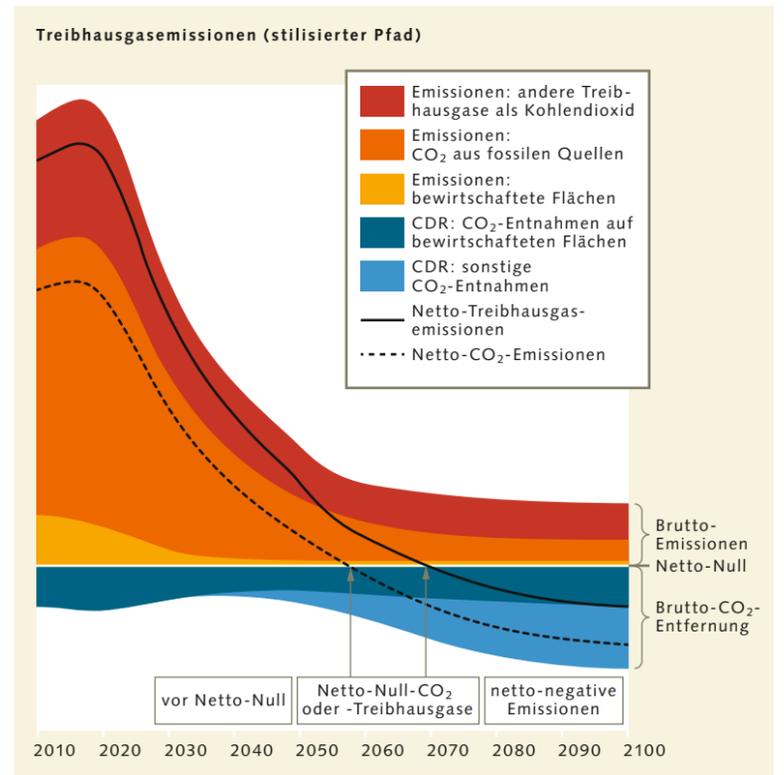
ausgleichen. Wenn es einigen Staaten gelänge, der Atmosphäre mehr Kohlendioxid zu entnehmen, als sie durch Emissionen freisetzen, entstünden sogenannte netto-negative Emissionen, also ein Emissionsguthaben. Andere Staaten könnten dieses Guthaben einlösen. Ihnen bliebe dann etwas mehr Zeit, ihren eigenen Treibhausgasausstoß zu reduzieren, ohne dass die Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre und somit auch die globale Durchschnittstemperatur weiter steigen würde.

Große Bedenken und viele ungeklärte Fragen

Bislang haben nur einige wenige Staaten andere CDR-Methoden als Aufforstung und Wiederaufforstung in ihre Klima-Langfriststrategien aufgenommen. Dennoch herrscht nach Aussage des Weltklimarates vielerorts die Sorge, dass allein die theoretische Möglichkeit und Machbarkeit einer verstärkten Kohlendioxid-Entnahme Regierungen und andere gesellschaftliche Akteure veranlassen könnte, ambitionierte Pläne für Treibhausgaseinsparungen nur halbherzig zu verfolgen oder aber im Kampf gegen den Klimawandel auf Technologien zu setzen, die noch nicht ausreichend entwickelt und erforscht sind.

Eine weitere Befürchtung lautet, dass die Hoffnung auf effektive CDR-Maßnahmen Entscheidungstragende veranlassen könnte, die Herausforderung der drastischen Treibhausgaseinsparungen nicht konsequent anzugehen und sie stattdessen in die Zukunft zu verschieben. Auf diese Weise müssten sich dann kommende Generationen mit dem stetig wachsenden Problem auseinandersetzen. Ungeklärt ist zudem, wie Kosten, Risiken und Lasten großflächiger CDR-Einsätze gleichmäßig verteilt werden könnten und wie sich negative Auswirkungen verhindern ließen – etwa auf die Nahrungsmittelproduktion, auf die Artenvielfalt und auf die Verfügbarkeit von Land.

Gebraucht würden zudem verlässliche und weltweit einheitliche Methoden, mit denen sich eine durch CDR-Maßnahmen erzielte Kohlendioxid-Entnahme und -einlagerung messen, verifizieren und bilanzieren ließen. Erst wenn diese Voraussetzungen erfüllt wären, könnte ein transparenter und funktionierender Markt entstehen, auf dem Emissionsguthaben gehandelt und finanzielle Mittel für die Umsetzung von CDR-Maßnahmen generiert werden könnten.



Nach Ansicht des Weltklimarates gilt es noch viele Herausforderungen zu meistern, bevor CDR-Methoden jenseits von Wiederaufforstung großflächig zum Einsatz kommen könnten. Dazu gehören die vielen noch offenen Forschungsfragen, die fehlende technische Entwicklungsreife, hohe Kosten sowie die Tatsache, dass ein möglicher künftiger Einsatz neuartiger CDR-Verfahren auch mit den übergreifenden Entwicklungs- und Nachhaltigkeitszielen der Menschheit im Einklang stehen muss. Aus diesem Grund bräuchte es geeignete Gesetze und Vorschriften sowie dazugehörige politische Entscheidungsprozesse, bevor neuartige CDR-Verfahren eingesetzt werden können.

Wie viel CDR wird künftig gebraucht?

Die Wissenschaft untersucht Ansätze und Ideen für den Kampf gegen den Klimawandel mithilfe integrierter Assessment-Modelle (Integrated Assessment Models, IAMs). Diese werden entwickelt, um zu verstehen, wie sich bestimmte gesellschaftliche oder ökonomische Ent-

1.29 > Eine aktive Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre wird benötigt, um kurzfristig die Netto-Emissionen des Menschen zu reduzieren, mittelfristig die Ziele der Kohlendioxid- und Treibhausgasneutralität zu erreichen sowie um langfristig die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre durch negative Emissionen zu senken.

1.30 > Durch Brandrodungen des Amazonas-Regenwaldes wurde hier, in der Nähe der brasilianischen Stadt Porto Velho, Ackerland für den Anbau von Soja gewonnen. Mit den Wäldern gehen riesige Kohlenstofflagerstätten verloren, denn die Bäume speichern Kohlenstoff sowohl in ihrer Holz- und Blattmasse als auch im Waldboden.



wicklungen auf die Natur und das Klima auswirken. Aus diesem Grund fließen in jedes dieser Modelle sowohl Informationen zum System Erde als auch zur Gesellschaft ein. Das heißt, die Modelle berücksichtigen Naturgesetze ebenso wie Verhaltensänderungen der Menschen und berechnen auch unerwünschte Nebenwirkungen oder aber beabsichtigte Vorteile bestimmter Maßnahmen und Entscheidungen. Die Modellaussagen sind zwar immer mit einer gewissen Unsicherheit belastet, dennoch liefern IAMs wertvolle Einsichten. Sie zeigen zum Beispiel auf, wie sich unsere Wirtschaft, Gesellschaft und Energieversorgung verändern müssten, wenn ein bestimmtes Klimaziel erreicht werden soll, oder aber welche Effekte bestimmte Emissionsreduktionen für Mensch und Natur hervorrufen würden.

Für den sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarates haben Forschende der IPCC-Arbeitsgruppe III Tausende solcher integrierter Assessment-Modelle ausgewertet. Dabei wurde deutlich, dass alle Modelle, die eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf zwei Grad Celsius oder weniger prognostizieren, den Einsatz von Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme fest mit einpla-

nen – und zwar in einem deutlich größeren Ausmaß als alles, was heutzutage bereits praktiziert wird.

In welchen Mengen Kohlendioxid künftig der Atmosphäre entnommen werden muss, um das Klima zu stabilisieren, ist noch nicht genau geklärt. Die Modellergebnisse erlauben nur grobe Schätzungen. Diese aber bewegen sich für landbasierte biologische Methoden wie zum Beispiel für Aufforstung und Wiederaufforstung im Bereich von 900 Millionen Tonnen Kohlendioxid netto im Jahr 2030. Netto bedeutet dabei, dass die Kohlendioxid-Entnahme durch (Wieder-)Aufforstung 900 Millionen Tonnen höher sein muss als die Summe der zur gleichen Zeit entstehenden globalen Landnutzungsemissionen (etwa durch Entwaldung in bestimmten Regionen). Zwei Jahrzehnte später müsste die Netto-Entnahmemenge dann schon fast drei Milliarden Tonnen Kohlendioxid betragen, wenn die globale Erwärmung langfristig auf unter zwei Grad Celsius begrenzt werden sollte. Hinzu kämen ähnlich hohe Kohlendioxid-Entnahmemengen durch die Energiegewinnung aus Biomasse sowie durch Direct Air Capture. Bei beiden Methoden müsste das abgeschiedene Kohlendioxid anschließend irgendwo sicher und dauerhaft eingelagert werden.

Der Weltklimarat kommt angesichts dieser hohen Schätzungen zu dem Schluss, dass bereits existierende Programme zur landbasierten Kohlendioxid-Entnahme massiv und sehr schnell ausgebaut werden müssten. Ob dies im erforderlichen Rahmen gelingen wird, sei jedoch fraglich.

Bislang sind die vom Weltklimarat untersuchten Assessment-Modelle noch nicht in der Lage, meeresgestützte Methoden der Kohlendioxid-Entnahme zu berücksichtigen. Daher liefert der sechste IPCC-Sachstandsbericht auch keine Angaben dazu, in welcher Größenordnung sie zum Erreichen des Pariser Klimaabkommens beitragen könnten. Erste Forscherteams haben es sich jedoch schon zur Aufgabe gemacht, IAMs mit der Komponente meeresbasierter Kohlendioxid-Entnahme zu entwickeln – darunter auch Forschende aus Deutschland. Ihre Arbeitsmotivation speist sich aus der Erkenntnis, dass der Ozean in der Vergangenheit bereits ein Viertel der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen aufgenommen und gespeichert hat – mit weitreichenden Folgen für Mensch und Natur.

CONCLUSIO

Die Klimakrise kennt nur eine Lösung: Treibhausgasneutralität

Durch den Ausstoß von Treibhausgasen hat die Menschheit in den zurückliegenden 120 bis 170 Jahren einen Anstieg der globalen Oberflächentemperatur um 1,15 Grad Celsius verursacht. Infolge dieser Erwärmung haben sich viele Komponenten des Erdklimas in einer Geschwindigkeit verändert, wie sie unser Planet seit Jahrtausenden nicht erlebt hat. Die Folgen dieser Klimaveränderungen schaden Mensch und Natur in einem zunehmenden Maß und berauben sie Stück für Stück ihrer Lebensgrundlagen. Dazu zählen in erster Linie Gesundheit und Unversehrtheit sowie ausreichend Wasser und Nahrung.

Alle Gebiete der Erde sind mittlerweile vom Klimawandel betroffen. Das Ausmaß der Veränderungen und die damit verbundenen Folgen und Risiken für Mensch und Natur unterscheiden sich jedoch von Region zu Region. Besondere Gefahren gehen von den zunehmenden Extremereignissen aus. Treten Hitzewellen, Starkregen, schwere Stürme, Dürren oder Überflutungen zudem gleichzeitig auf, vergrößert sich das Gesamtrisiko und es fällt Mensch und Natur schwerer, wirksame Schutzmaßnahmen zu treffen. Der Klimawandel erhöht zudem die Risiken anderer menschengemachter Stressfaktoren wie Umweltzerstörung, Ressourcenübernutzung und Verstärkung und verringert so die Anpassungsmöglichkeiten aller Bewohner der Erde.

Jedes weitere Zehntelgrad Erwärmung wird dazu führen, dass sich der angestoßene Klimawandel verstärkt. Das heißt, das Ausmaß und die extreme Geschwindigkeit der Veränderungen sowie die damit verbundenen Folgen und Risiken werden mit jedem weiteren Temperaturanstieg zunehmen. Begrenzen lässt sich eine Eskalation der Klima- und Artenvielfaltskrise nur durch wirkungsvolle Anpass-

ungsmaßnahmen sowie durch eine Vermeidung jeglicher weiterer Treibhausgasemissionen (Treibhausgasneutralität).

Klimaforschende gehen jedoch davon aus, dass die Staatengemeinschaft selbst bei sehr ambitionierter Klimapolitik auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch Treibhausgas-Restmengen emittieren wird, darunter Kohlendioxid-Restmengen, vor allem aber Methan und Lachgas. Diese schwer vermeidbaren Emissionen werden zum Beispiel bei der Zement- und Stahlherstellung, im Flug- und Schwerlasttransport aber auch in der Landwirtschaft und bei der Müllverbrennung entstehen.

Um die globale Erwärmung zu stoppen, müssen diese Restemissionen ausgeglichen werden. Das heißt, Kohlendioxid muss im selben Umfang der Erdatmosphäre entnommen werden. Entsprechende Lösungsideen existieren: Sie setzen entweder auf den Ausbau der natürlichen Kohlenstoffsenken oder aber stellen technologische Ansätze dar. Zudem unterscheiden sich die Entnahmemethoden darin, für welchen Zeitraum sie das Kohlendioxid der Atmosphäre entziehen und in welchem Größenmaßstab sie angewendet werden können.

Unklar ist in vielen Fällen jedoch, welche möglichen Risiken ein Einsatz mit sich brächte, welche Kosten entstünden und ob die benötigte Technik überhaupt schon entwickelt und einsatzbereit ist. Es fehlt somit elementares Wissen über Maßnahmen, die schon bald im industriellen Maßstab durchgeführt werden müssen, wenn die Menschheit ihr Ziel einer treibhausgasneutralen Zukunft erreichen will. Eines aber steht heute schon fest: Maßnahmen zur Kohlendioxid-Entnahme dürfen niemals als Ausrede dafür dienen, vermeidbare Treibhausgasemissionen fortzusetzen, denn im Kampf gegen die Klima- und Artenvielfaltskrise zählt am Ende jede einzelne Tonne eingespartes Kohlendioxid.