

Teil I Naturwissenschaftliche Grundlagen

Unsere natürlichen Lebensgrundlagen stehen unter Druck: Neben dem Klimawandel, der in den letzten Jahren berechtigterweise viel mediale und politische Aufmerksamkeit erfahren hat, ist die Welt mit einem dramatischen Biodiversitätsverlust und mit weltweiter Verschmutzung konfrontiert. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) spricht in diesem Zusammenhang von einer dreifachen planetaren Krise (triple planetary crisis). Alle drei Krisen sind menschengemacht. Sie haben jeweils individuelle Ursachen, beeinflussen sich aber auch gegenseitig. Sie zu lösen, ist eine zentrale Menschheitsaufgabe, um langfristig ein gutes Leben auf diesem Planeten zu ermöglichen.

Die Hauptursache für den Klimawandel ist die Verbrennung fossiler Energieträger, die zu einem Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre führt. Eine zentrale Auswirkung des Klimawandels ist der Anstieg der mittleren globalen Oberflächentemperatur. Sie liegt aktuell bereits 1,1 °C über der vorindustriellen Zeit. Weil CO₂ in der Atmosphäre sehr stabil ist, lässt sich dieser Temperaturanstieg nicht kurzfristig rückgängig machen. Damit einher geht auch eine Zunahme von Temperaturextremen. Auch andere Wetterextreme wie Starkregenereignisse oder Dürren werden häufiger. Dies führt zu Risiken für die Ernährungssicherheit und die Gesundheit. Zudem befeuert der Klimawandel zusätzlich den Biodiversitätsverlust.

Die Hauptursache für den Biodiversitätsverlust liegt aber in der Veränderung der Land- und Meeresnutzung durch den Menschen. So sind mittlerweile 75 % der Landoberfläche durch den Menschen maßgeblich verändert. Zudem tragen direkte Übernutzung, Verschmutzung und invasive Arten zum Biodiversitätsverlust bei. Dies hat zur Folge, dass weltweit ein bis zwei Millionen Arten vom Aussterben bedroht sind. Die Wissenschaft geht davon aus, dass das sechste Massensterben in der Geschichte der Erde begonnen hat. Genau wie der Klimawandel gefährdet auch der Biodiversitätsverlust die Ernährungssicherung, die weltweite Wirtschaft und die Gesundheit. Gleichzeitig verstärkt der Biodiversitätsverlust auch die Auswirkungen des Klimawandels.

Verschmutzung ist die dritte große menschengemachte Umweltkrise. Sie ist eine der Ursachen für den Klimawandel und den Biodiversitätsverlust, gefährdet die Gesundheit aber auch direkt. Während manche Formen der Verschmutzung glücklicherweise zurückgehen, sind andere weiterhin sehr präsent oder nehmen zu. Problematisch sind beispielsweise die Verschmutzung der Luft mit Feinstäuben und Stickstoffoxiden, die Verunreinigung von Trink- und Grundwasser mit Nitrat, die Kontaminierung der Ozeane mit Quecksilber und Plastik sowie die Belastung des Bodens mit Pflanzenschutzmitteln und Industriechemikalien. Schätzungen ge-

hen davon aus, dass Umweltverschmutzung für 9 Millionen vorzeitige Todesfälle pro Jahr verantwortlich ist.

Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über die wichtigsten Grundlagen der drei menschengemachten Umweltkrisen. Das Verständnis dieser grundlegenden Zusam-

menhänge ist für das Verständnis der Auswirkungen der Umweltkrisen und für das Verständnis der Strategien zum Umgang mit ihnen wichtig. Es kann aber auch im Kontakt mit Patient:innen oder Entscheidungsträger:innen hilfreich sein, diese Grundlagen zu kennen.

1 Klimawandel

Astrid Schulz

1.1 Einleitung

Der Mensch hat das Klimasystem eindeutig verändert, und die Auswirkungen lassen sich weltweit spüren: Die Atmosphäre und der Ozean haben sich erwärmt, die Menge an Schnee und Eis auf diesem Planeten hat abgenommen, der Meeresspiegel ist angestiegen und der Ozean ist saurer geworden. Die mittlere globale Oberflächentemperatur liegt heute etwa 1,1 °C über dem vorindustriellen Wert (IPCC, 2023). 2023 war das bisher wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen (WMO, 2023).

Der Grund dafür ist die geänderte Zusammensetzung der Atmosphäre: Seit Beginn der Industrialisierung hat sich der CO₂-Gehalt der Atmosphäre um mehr als 50 % erhöht, der Anteil von Lachgas um 23 %, der von Methan sogar um 156 %. Die Konzentration von Methan und Lachgas in der Atmosphäre ist heute höher als in den letzten 800.000 Jahren, die Konzentration von CO₂ sogar so hoch wie seit mindestens zwei Mio. Jahren nicht mehr. Dieser Anstieg

ist durch menschliche Aktivitäten verursacht, allen voran die Verbrennung fossiler Energieträger, die 80–90 % des CO₂-Anstiegs verursacht hat (Canadell et al., 2021, S. 676). Es lässt sich sogar zeigen, dass die Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre wie erwartet durch diese massenhafte Verbrennung sinkt – dies ist für sich genommen allerdings nicht bedrohlich, weil die Gesamtmenge an Sauerstoff so groß ist.

CO₂ reichert sich in der Atmosphäre an. Auch über einen Zeitraum von 1.000 Jahren wird ein erheblicher Anteil des CO₂, das der Mensch in die Atmosphäre eingetragen hat, dort verbleiben. Stellt man die CO₂-Emissionen komplett ein, bleibt die bis zu diesem Zeitpunkt erfolgte Erwärmung über einige Jahrhunderte erhalten. Ein erheblicher Teil des Klimawandels ist daher auf menschlichen Zeitskalen irreversibel, falls das CO₂ der Atmosphäre nicht großmaßstäblich entzogen würde. Dies ist jedoch mit heute verfügbaren Technologien nur begrenzt möglich.

1.2 Ursachen und Zusammenhänge

Die mittlere Temperatur der Erdoberfläche (genau genommen der erdnahen Atmosphäre) bestimmt sich im Wesentlichen aus einem Strahlungsgleichgewicht: Ein Teil der Erde (dort wo gerade Tag ist) wird von der Sonne

beschienen – hier trifft überwiegend Strahlung im sichtbaren Bereich auf die Erde –, ein Teil wird reflektiert, der Rest erwärmt die Erdoberfläche. Gleichzeitig gibt die Erde selbst permanent in alle Richtungen Wärme-

strahlung ab – dies ist Strahlung im infraroten Bereich. Treibhausgase interagieren nicht mit dem sichtbaren Licht, die Atmosphäre ist im Wesentlichen durchsichtig. Die Treibhausgase sind aber infrarotaktiv, d. h., sie absorbieren und emittieren Wärmestrahlung. Steigt ihre Konzentration in der Atmosphäre, wird die Abstrahlung der Wärme in den Weltraum erschwert – die Erde erwärmt sich, bis wieder ein Gleichgewicht hergestellt ist.

Haupttreiber des Klimawandels ist die Verbrennung fossiler Energieträger, d. h. Kohle, Erdgas und Erdöl. Sie bestehen zu einem erheblichen Teil aus Kohlenstoff, der bei der Verbrennung – in Kohle- und Gaskraftwerken, Automotoren, Ölheizungen usw. – zu CO_2 umgewandelt wird. CO_2 ist ein Gas, das sehr stabil ist und daher in der Atmosphäre nicht chemisch abgebaut wird. Es ist aber wasserlöslich und kann durch den Prozess der Photosynthese durch Pflanzen aufgespalten werden. Mehr als die Hälfte des vom Menschen in die Atmosphäre abgegebenen CO_2 wird so unmittelbar von der Biosphäre (die 31% aufnimmt) und vom Ozean (26%) aufgenommen. Mittelfristig nimmt der Ozean noch weiteres CO_2 auf, bis eine Sättigung eintritt. Etwa 20–30% des CO_2 verbleiben aber über viele Jahrhunderte in der Atmosphäre.

Die CO_2 -Aufnahme durch den Ozean ist übrigens keine sehr positive Angelegenheit: Der pH-Wert des Ozeans sinkt dadurch, er wird also saurer. Dazu unten mehr.

Eine weitere CO_2 -Quelle sind Landnutzungsänderungen, z. B. die Abholzung von Wäldern. Diese Emissionen sind in den letzten zwanzig Jahren etwas gesunken und liegen heute bei etwa 4 Mrd. Tonnen CO_2 pro Jahr. Die CO_2 -Emissionen aus der Verbrennung fossiler Emissionen steigen hingegen (nach einem kurzen Einbruch während der COVID-19-Pandemie) unvermindert an und liegen derzeit bei 37,5 Mrd. Tonnen CO_2 pro Jahr. Während im Jahr 1960 Landnutzungsänderungen für die Hälfte der anthro-

pogenen CO_2 -Emissionen verantwortlich waren, machen sie heute gerade noch 12% der Emissionen aus – vor allem aufgrund des starken Anstiegs der Nutzung fossiler Energieträger (Global Carbon Project, 2023).

Neben CO_2 sind auch weitere Treibhausgase und klimawirksame Stoffe von Bedeutung für die Entwicklung des Klimas, die wichtigsten davon sind Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4). Beide Gase sind stärkere Treibhausgase als CO_2 , haben allerdings eine kürzere Lebensdauer in der Atmosphäre: Lachgas etwa 116 Jahre und Methan sogar nur 9 Jahre (Canadell et al., 2021). Vor allem Methan reichert sich daher nicht wie CO_2 in der Atmosphäre an, sondern wird permanent wieder abgebaut – bleiben die Methanemissionen konstant, stellt sich ein »steady state« ein, d. h., die Methankonzentration in der Atmosphäre bleibt auch konstant. Derzeit steigen aber die Emissionen und damit die Konzentration von Methan an. Steigende Methanemissionen stammen zum einen aus der Förderung und Nutzung fossiler Energieträger, zum anderen aus der Landwirtschaft (überwiegend aus der Viehhaltung). Auch Lachgas kann bei konstanten Emissionen einen steady state erreichen, allerdings aufgrund der längeren Lebensdauer erst nach über 100 Jahren. Aktuell steigen aber auch die Lachgasemissionen weiter an. Die jüngsten Anstiege der Emissionen von Lachgas sind überwiegend auf die Ausbringung von Düngemitteln in der Landwirtschaft zurückzuführen, aber auch die Nutzung fossiler Energieträger, Industrie, Verbrennung von Biomasse und Abwasser spielen eine Rolle.

Weitere kleinere Beiträge zur Klimaerwärmung stammen von industriellen Gasen, die sehr stark mit der Infrarotstrahlung wechselwirken, aber bisher nur in geringen Konzentrationen in der Atmosphäre vorkommen – allerdings steigt ihr Beitrag an.

Auch Aerosole, die durch den Menschen in die Atmosphäre eingetragen werden, beeinflussen das Klima, wobei einige (z. B. Ruß)

erwärmend wirken, andere (z. B. Schwefelverbindungen) der Erwärmung entgegenwirken,

indem sie das einfallende Sonnenlicht reflektieren.

1.3 Auswirkungen

Veränderungen sind bei allen Aspekten des Klimasystems zu beobachten. Im Folgenden werden einige der wichtigsten Veränderungen mit ihren Auswirkungen skizziert.

1.3.1 Temperaturanstieg

Offenkundige Auswirkung des Klimawandels ist die Temperaturerhöhung in der unteren Atmosphäre: Sie äußert sich nicht nur darin, dass die mittleren bodennahen Lufttemperaturen weltweit steigen, sondern auch in einer Zunahme von Temperaturextremen. Hitzeperioden werden in Städten noch durch den Hitzeinseleffekt verstärkt: Asphalt und Beton speichern Wärme, dichte Bebauung erschwert die Luftzirkulation, so dass ein Temperaturunterschied von mehreren °C zwischen Städten und ihrem Umland entstehen kann. Dieser ist nachts durch die fehlende Abkühlung besonders ausgeprägt. Hitzeextreme verschlimmern zudem die Auswirkungen von Luftverschmutzung, können Funktionen wichtiger Infrastrukturen einschränken und führen weltweit zu Todesfällen und Erkrankungen.

Auf beiden Erdhalbkugeln verschieben sich die Klimazonen in Richtung der Pole, was sich auch auf die Ökosysteme auswirkt: Etwa die Hälfte der untersuchten Arten sind polwärts oder in höhere Lagen gewandert; Strukturen und Funktionen von Ökosystemen verschlechtern sich, Verschiebungen in den jahreszeitlichen Abläufen werden beobachtet (IPCC, 2022a). Auch Verbreitungsgebiete von Vektoren und damit die Möglichkeiten der Übertragung von Krankheiten

ändern sich. Auf der Nordhalbkugel hat sich die Vegetationsperiode durch die Erwärmung verlängert, was sich beispielsweise negativ auf Allergien auswirkt.

Nicht nur die Atmosphäre erwärmt sich, sondern auch der Ozean – zumindest in den oberen 700 m der Ozeane lässt sich eine durch den Menschen verursachte Erwärmung deutlich nachweisen. Der Ozean kann enorme Wärmemengen aufnehmen und befindet sich noch längst nicht im thermischen Gleichgewicht mit der Atmosphäre – er wirkt also derzeit noch kühlend auf die Atmosphäre. Dies ist auch der Grund dafür, dass die Temperaturen über Land bereits deutlich stärker gestiegen sind als über den Ozeanen.

1.3.2 Niederschläge und Wasserverfügbarkeit

Der Klimawandel wirkt sich auch auf den globalen Wasserkreislauf aus: Je wärmer die Luft ist, desto mehr Wasser kann sie potenziell aufnehmen – pro 1 °C Erwärmung steigt die Aufnahmekapazität um 7%. Damit sind mehr und stärkere Niederschläge möglich. Weltweit gemittelt hat der Niederschlag auch bereits zugenommen, genauso wie die Häufigkeit und Intensität von Starkregen. Weil gleichzeitig mit den steigenden Temperaturen auch die Verdunstung zunimmt, wird es aber trotzdem in vielen Regionen trockener. Der Klimawandel kann deshalb sowohl zu Sturzfluten als auch zu Dürren beitragen – er führt also insgesamt zu einer größeren Variabilität in der Wasserverfügbarkeit und zu mehr Extremen.

Im globalen Mittel befindet sich durch die Klimaerwärmung mehr Wasserdampf in der Atmosphäre – und da Wasserdampf auch mit der Infrarotstrahlung interagiert, verstärkt dies die Erwärmung weiter: Es wird geschätzt, dass diese Rückkopplung den Erwärmungseffekt von CO₂ verdoppelt.

1.3.3 Verlust von Eismassen

Weltweit haben sich die Gletscher zurückgezogen. Auch das jahreszeitlich schwankende arktische Meereis ist betroffen: Innerhalb von 30 Jahren hat sich seine typische Ausdehnung im September um 40% verringert, jene im März um 10%. Auch Grönland und die Antarktis verlieren Eis. Die Schneedecke im Frühjahr auf der Nordhalbkugel ist heute deutlich geringer als in den 1950er Jahren. Der arktische Permafrost taut auf. Schnee und Eis reflektieren das Sonnenlicht – schmelzen sie, erwärmt sich die darunterliegende Fläche um so schneller. Durch diesen Rückkopplungseffekt reagieren die von Schnee und Eis beherrschten Regionen der Erde extrem sensibel auf die Klimaerwärmung. Die Arktis erwärmt sich daher etwa doppelt so schnell wie der globale Durchschnitt.

Das Abschmelzen der Gletscher wirkt sich auf die Wasserverfügbarkeit für Landwirtschaft, Wasserkraft und menschliche Siedlungen aus und kann u. a. zu größeren Schwankungen in der jahreszeitlichen Verfügbarkeit von Wasser führen. Die genauen Auswirkungen unterscheiden sich regional und je nach Größe der Gletscher: Durch das Abschmelzen steigt die Wassermenge gletschergespeister Flüsse besonders im Sommer zunächst an. Dieser Trend dreht sich mit dem weiteren Schrumpfen der Gletscher aber um und die Abflussmenge nimmt ab – ganz besonders im Sommer, da mit dem Verschwinden der Gletscher auch ihre Funktion als »Zwischenspeicher« für Niederschlag verschwindet. Die großen Gletscher weltweit befinden sich noch in der Phase verstärkter Abflüsse, während

einige kleinere schon die Trendumkehr erreicht haben. Veränderungen der kontinentalen Eismassen wirken sich direkt auf die Höhe des Meeresspiegels aus.

1.3.4 Meeresspiegelanstieg

Seit dem Ende der letzten Eiszeit vor 20.000 Jahren ist der Meeresspiegel um etwa 120 m gestiegen, wobei er sich vor 2.000 bis 3.000 Jahren stabilisierte und bis 1900 nahezu konstant blieb. In dieser Zeit des konstanten Meeresspiegels haben sich an den Küsten Siedlungen entwickelt, und sehr viele Großstädte sind dort entstanden. Zwischen 1901 und 2018 ist der globale mittlere Meeresspiegel um 20 cm angestiegen. Der Anstieg beschleunigt sich: Während der Meeresspiegel zwischen 1901 und 1971 um 1,3 cm pro Jahr stieg, waren es zwischen 2006 und 2018 schon 3,7 cm pro Jahr (IPCC, 2023, S. 5).

Der Meeresspiegel steigt aus verschiedenen Gründen: Zum einen führt bereits die thermische Ausdehnung des Meerwassers durch die Erwärmung zu einem Anstieg des Meeresspiegels – wärmeres Wasser nimmt mehr Raum ein als kälteres. Dieser Prozess ist derzeit für etwa die Hälfte des beobachteten Meeresspiegelanstiegs verantwortlich. Den anderen (steigenden) Anteil am Meeresspiegelanstieg haben abschmelzende Gletscher und die kontinentalen Eisschilde in Grönland und der Antarktis sowie eine abnehmende Speicherung von Wasser an Land, z. B. in Seen.

Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte der Meeresspiegelanstieg bis zu 1 m erreichen, abhängig von den zukünftigen Emissionen. Nach Einschätzung des IPCC könnte mittelfristig etwa eine Milliarde Menschen durch küstenspezifische Klimagefahren bedroht sein werden, einschließlich auf kleinen Inseln (IPCC, 2022a). Für einige kleine Inseln und niedrig gelegene Küsten ist der Meeresspiegelanstieg eine existenzielle Bedrohung. Beispiele sind die Inseln von Kiribati, den Malediven oder Tuvalu (Kelman, 2015).

1.3.5 Ozeanversauerung

Etwa die Hälfte des durch die Menschen in die Atmosphäre abgegebenen CO₂ wird am unteren Rand der Atmosphäre unmittelbar vom Ozean und der Biosphäre aufgenommen; mittelfristig nimmt der Ozean noch weiteres CO₂ auf, bis eine Sättigung eintritt. Durch die Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre ändert sich das chemische Gleichgewicht des Meerwassers. Seit Beginn der industriellen Revolution ist der pH-Wert der Meere dadurch um 0,1 gesunken, d. h., der Ozean ist deutlich saurer geworden. Besonders Korallenriffe sind durch die Versauerung bedroht. Da sie gleichzeitig unter der Erwärmung des Meerwassers und dem Meeresspiegelanstieg leiden, sind sie besonders gefährdet.

1.3.6 Hurrikans

Hurrikans beziehen ihre Energie aus dem warmen Meerwasser. Es erstaunt daher nicht, dass der Anteil schwerer Hurrikans (Kategorie 3–5) zugenommen hat und dass auch ihr Verbreitungsgebiet sich ausgedehnt hat. Die Kombination schwerer Hurrikans mit einem steigenden Meeresspiegel kann zu immer höheren Gefährdungen in den betroffenen Regionen führen.

1.3.7 Auswirkungen des Klimawandels wirken zusammen und werden sich mit steigenden Temperaturen verschärfen

Der Klimawandel hat bereits in allen Weltregionen Wetter- und Klimaextreme beeinflusst (IPCC, 2023, S. 5), z. B. Hitzewellen, Starkregenereignisse, Dürren und tropische Zyklone (Hurrikans). Mittlerweile kann der menschliche Einfluss auf solche Ereignisse auch immer besser nachgewiesen werden.

Der Klimawandel wird zunehmend die Nahrungsmittelproduktion und den Zugang zu Nahrungsmitteln erschweren. Steigende Häufigkeit, Intensität und Schwere von Dürren, Überschwemmungen und Hitzewellen sowie der anhaltende Meeresspiegelanstieg werden die Risiken für die Ernährungssicherheit in verwundbaren Regionen deutlich ansteigen lassen, wenn keine ausreichende Anpassung stattfindet. Auch die Risiken durch über Lebensmittel, Wasser und Vektoren übertragene klimaabhängige Krankheiten steigen. Der IPCC rechnet zudem damit, dass psychische Gesundheitsprobleme, einschließlich Angst und Stress, bei weiterer globaler Erwärmung zunehmen, insbesondere bei Kindern, Jugendlichen, älteren Menschen und Menschen mit Vorerkrankungen (IPCC, 2022a).

Der Klimawandel ist zudem ein zusätzlicher Stressor für die Biodiversität und verstärkt das Massenaussterben, das der Mensch ausgelöst hat – überwiegend durch die Zerstörung natürlicher Ökosysteme durch die Umwandlung von Flächen für die menschliche Nutzung (siehe ► Kap. 2).

Mit Fortschreiten des Klimawandels können außerdem Kippunkte überschritten werden, jenseits derer deutliche Systemänderungen auftreten, die auch bei einer Absenkung der Temperatur nicht mehr reversibel wären – z. B. das Abschmelzen des grönländischen Eisschildes (Lenton et al., 2019). Jenseits eines solchen tipping points könnte das vollständige Abschmelzen der grönländischen Eismassen, das einen Anstieg des Meeresspiegels um 7 m nach sich ziehen würde, unausweichlich werden. Das Abschmelzen könnte sich über mehrere Jahrtausende erstrecken oder auch schneller passieren: Die Dynamik der Eisschmelze ist schlecht prognostizierbar. Auch für den Amazonas wird ein solcher tipping point angenommen: Die Kombination von zunehmender klimawandelbedingter Dürre mit zunehmender Abholzung könnte zu einem Zusammenbruch weiter Teile des Regenwaldes führen.

Nachteilige Folgen aufgrund des menschengemachten Klimawandels werden sich weiterhin verstärken

a) Beobachtete weitverbreitete und bedeutende Folgen sowie damit verbundene Verluste und Schäden, die dem Klimawandel zugeordnet werden



b) Folgen werden durch Änderungen von vielfältigen physischen Klimabedingungen angetrieben, die zunehmend dem Einfluss des Menschen zugeordnet werden



c) Das Ausmaß, zu dem gegenwärtige und zukünftige Generationen eine heißere und andere Welt erleben werden, hängt von Entscheidungen jetzt und in der nahen Zukunft ab

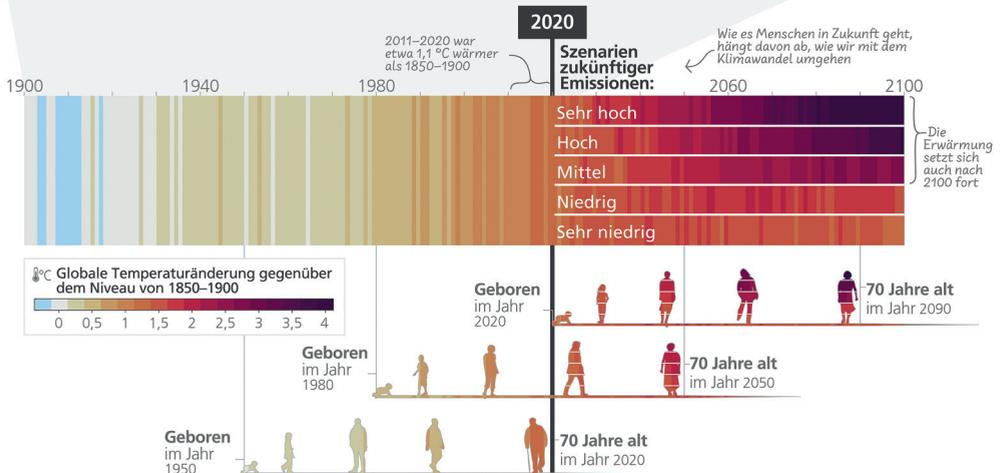


Abb. 1.1: Nachteilige Folgen des menschengemachten Klimawandels (IPCC, 2023, dort: Abbildung SPM.1, mit freundlicher Genehmigung)

1.4 Möglichkeiten des Gegensteuerns

Im Übereinkommen von Paris hat sich die internationale Staatengemeinschaft im Jahr 2015 darauf geeinigt, die Erderwärmung deutlich unterhalb von 2 °C verglichen mit dem vorindustriellen Niveau zu stoppen und Anstrengungen zu unternehmen, sie sogar auf 1,5 °C zu begrenzen.

Aus physikalischer Sicht sind die Implikationen aus dieser Einigung eindeutig: Um den Klimawandel aufzuhalten, ist es notwendig, die anthropogenen CO₂-Emissionen netto auf Null zu bringen. Dabei wird das Ausmaß des Klimawandels weitgehend durch die Gesamtmenge des von den Menschen emittierten CO₂ bestimmt. Häufig wird daher ein CO₂-Budget benannt, d. h. eine Gesamtmenge an CO₂-Emissionen, die nicht überschritten werden darf, wenn ein bestimmtes Temperaturziel eingehalten werden soll. Bei der gegenwärtigen Höhe der Emissionen wird das CO₂-Budget, das noch zur Verfügung steht, wenn eine Erwärmung von 1,5 °C nicht überschritten werden soll, in wenigen Jahren aufgebraucht sein.

Auch die Emissionen der anderen Treibhausgase wie Methan und Lachgas müssen deutlich gesenkt werden: Sie entscheiden mit darüber, bei welcher Temperatur genau der Klimawandel aufgehalten werden kann. Minderungen der anderen Treibhausgase können aber den Stopp der CO₂-Emissionen nicht ersetzen: Solange weiter netto CO₂ in die Atmosphäre eingetragen wird, wird der Klimawandel fortschreiten und kann allenfalls verzögert werden.

Falls eines Tages die Emissionen langlebiger Treibhausgase gestoppt sind, bleibt die Temperaturerhöhung auf dem bis dahin erreichten Niveau etwa bestehen – und einige Prozesse (wie z. B. der Anstieg des Meeresspiegels) schreiten weiter voran. Es ist also eine erhebliche Herausforderung, den Klimawandel aufzuhalten – ihn rückgängig zu machen, würde noch einen weit höheren Aufwand

bedeuten, nämlich die gezielte Entnahme großer Mengen von CO₂ aus der Atmosphäre. Und einige Aspekte des Klimawandels können ggf. gar nicht rückgängig gemacht werden.

Wie sich die Begrenzung des Klimawandels auf 2 oder 1,5 °C konkret umsetzen lässt, ist eine sehr viel komplexere Frage, auf die es nicht nur eine Antwort gibt und die daher auch Raum für politische Aushandlungsprozesse lässt. Häufig werden sogenannte Integrated-Assessment-Modelle (IAM) verwendet, um Möglichkeiten der technischen Umsetzung zu erkunden. Solche Modellrechnungen zeigen, dass ein Stopp des Klimawandels tiefgreifende Änderungen in allen Sektoren erfordert.

Im Zentrum des Klimaschutzes steht die Notwendigkeit, die Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) so vollständig wie möglich einzustellen. Dies kann mit einem bedeutenden direkten Nutzen für die Gesundheit einhergehen, da ein erheblicher Teil der Luftverschmutzung weltweit auf fossile Energieträger zurückgeht. In den Modellen ist vorgesehen, die ggf. verbleibende Nutzung fossiler Energieträger so zu gestalten, dass die Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre minimiert wird. Technologien, um CO₂ aus Abgasen zu entfernen und sicher einzulagern (Carbon dioxide capture and storage, CCS) sind allerdings bisher nicht großmaßstäblich erprobt und werden kontrovers diskutiert, u. a. aufgrund hoher Kosten, hohem Energieaufwand und weil es nicht möglich ist, das CO₂ vollständig aus einem Abgasstrom zu entfernen. Ob wirklich fossile Energieträger in nennenswertem Ausmaß weiter genutzt werden können, wenn der Klimawandel aufgehalten werden soll, ist also eher fraglich. Mit der Abkehr von den fossilen Energieträgern können auch die mit der Förderung und Nutzung verbundenen Methan- und Lachgasemissionen vermieden werden.

Die notwendige globale Energiewende erfordert einen erheblichen Ausbau erneuerbarer Energien (vor allem Wind- und Solarenergie) sowie Effizienzsteigerungen und weitere Maßnahmen, um die Energienachfrage in Grenzen zu halten. Damit auch im Verkehr und im Wärmesektor erneuerbare Energien genutzt werden können, wird hier in der Regel von einer verstärkten Elektrifizierung ausgegangen. Ermutigend ist, dass die Kosten entsprechender Technologien (Solar- und Windenergie, Batterien) seit 2010 massiv gefallen sind (IPCC, 2023, S. 54). Die Nutzung von Bioenergie, die ja auch eine Form erneuerbarer Energien ist, wird kontrovers diskutiert, insbesondere aufgrund ihres hohen Flächenbedarfs, Konkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion und dem Ökosystemschutz sowie ineffizienter Energieumwandlung (WBGU, 2009, 2020).

Weitere wichtige Bereiche sind die Land- und Forstwirtschaft. Die wichtigsten Klimaschutzmaßnahmen sind hier die Verringerung von Entwaldung, nachhaltiges Forstmanagement, die Wiederherstellung von Ökosystemen, Aufforstung und Wiederaufforstung sowie die Nutzung landwirtschaftlicher Methoden, bei denen Kohlenstoff gespeichert wird (z. B. Humusaufbau). Auch die Methan- und Lachgasemissionen in der Landwirtschaft können gesenkt, wenn auch nicht völlig vermieden werden. Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft kann vielfach so gestaltet werden, dass Synergien mit dem Schutz der Biodiversität erreicht werden, dies ist aber nicht automatisch der Fall. Ebenso sind Landnutzungskonkurrenzen und Zielkonflikte mit Ernährungssicherung oder Biodiversitätsschutz möglich.

Auf der Nachfrageseite können der Umstieg auf ausgewogene, nachhaltige gesunde Ernährung sowie die Verringerung von Lebensmittelverlusten und -verschwendung Beiträge leisten.

Zunehmend ins Gespräch kommt die Notwendigkeit, der Atmosphäre aktiv CO₂ zu

entziehen. Die Möglichkeiten hierzu sind jedoch mit der gegenwärtigen Technologie begrenzt und die Methoden vielfach mit Risiken verbunden. Sie reichen von großskaliger Aufforstung über die Nutzung von Bioenergie kombiniert mit der Abscheidung und Einlagerung von CO₂ bis hin zu technischen Methoden, das CO₂ direkt aus der Luft zu entfernen.

Schließlich gibt es noch eine Diskussion über Ansätze zur Veränderung der Sonneneinstrahlung (solar radiation modification) mit dem Ziel, die Temperaturen senken. Solche Methoden bergen allerdings ein breites Spektrum an neuen Risiken für Menschen und Ökosysteme, die nicht gut verstanden sind. Eine Veränderung der Sonneneinstrahlung würde zudem bei fortgesetzten anthropogenen Emissionen weder den Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen aufhalten noch die daraus resultierende Ozeanversauerung in Grenzen halten.

Selbst wenn es gelingt, den Klimawandel wie in Paris vereinbart zu begrenzen, werden die Auswirkungen des Klimawandels erheblich sein (► Abb. 1.1). Über Land steigt die Temperatur schneller als über dem Ozean; hier ist bereits eine Erwärmung von mehr als 1,5 °C erreicht (IPCC, 2019, S. 5). Und nicht alle Aspekte des Klimawandels lassen sich überhaupt im Rahmen menschlicher Zeitskalen stoppen. Der Meeresspiegelanstieg ebenso wie die Erwärmung und Versauerung der Meere werden noch über Jahrtausende fortschreiten, auch wenn es gelingt, den Temperaturanstieg in der Atmosphäre zu stoppen (Arias et al., 2021, S. 106). Allerdings hängt auch hier das Ausmaß extrem davon ab, wie schnell und wie stark die Emissionen gesenkt werden.

Es sind daher in jedem Fall politische Maßnahmen und Strategien zur Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels notwendig.

Eine nachhaltige Zukunftsgestaltung muss deshalb die Eingrenzung des Klimawandels mit der Anpassung an seine Folgen kombi-