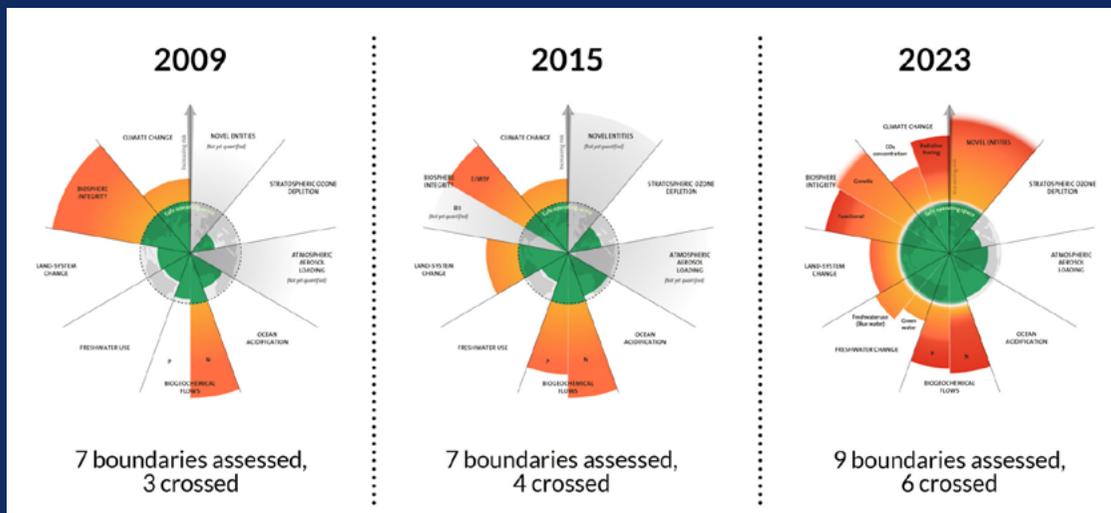


Planetare Grenzen

Wieviele menschliche Eingriffe verkräftet der Lebensraum Erde?



Planetare Grenzen im Zeitverlauf © Azote for Stockholm Resilience Centre, based on analysis in Richardson et al 2023

Inhalt

| | |
|---|----|
| Planetare Grenzen: Eine Einführung | 2 |
| Der Klimawandel | 4 |
| Überladung mit neuartigen Substanzen | 6 |
| Aerosolbelastung in der Atmosphäre | 8 |
| Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre | 10 |
| Versauerung der Ozeane | 12 |
| Störung der biogeochemischen Kreisläufe | 13 |
| Veränderung in Süßwassersystemen | 15 |
| Veränderung der Landnutzung | 17 |
| Veränderung in der Integrität der Biosphäre | 19 |

Planetare Grenzen: Wieviel menschliche Eingriffe verkräftet der Lebensraum Erde?

Mit dem Konzept der Planetaren Grenzen haben Forschende im Jahr 2009 Leitlinien für menschliche Einflüsse auf die Umwelt aufgestellt. Jenseits der beschriebenen Grenzwerte ist die Stabilität der Lebensräume für Menschen und andere Arten auf der Erde gefährdet. Was hat dieses Konzept bisher in Forschung und Gesellschaft bewirkt – und wo liegen seine Schwächen?

„Das Konzept der Planetaren Grenzen zeigt, aufbauend auf empirischem Wissen, eine Art wünschenswertes Bild des Planeten“, sagt Hans-Otto Pörtner, Meeresbiologe und Experte für Auswirkungen des Klimawandels auf die Ozeane am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. „Dieses Bild wird auf verschiedene Prozesse im Erdsystem angewandt, um zu verdeutlichen, welche Veränderungen ungünstig für die Menschheit und die aktuellen Lebensbedingungen auf dem Planeten sind.“ Das soll den systemischen Blick auf Mensch-Umwelt-Interaktionen fördern und konkrete Handlungen anleiten.

Grenzen menschlicher Einflüsse definieren

Das Konzept der Planetaren Grenzen ist einer von verschiedenen Ansätzen, die Auswirkungen und Folgen menschlicher Einflüsse auf den Planeten Erde deutlich zu machen und Grenzen dieser Einflüsse zu definieren. Schon 1972 schilderte beispielsweise der Club of Rome in der Studie „Grenzen des Wachstums“ die Dynamiken und Risiken exponentieller Entwicklungen mit Blick auf fünf Bereiche der Menschheitsentwicklung. Die Autor:innen der Studie wiesen auch auf die Herausforderung hin, Prozesse in komplexen Systemen zu durchschauen und vorherzusagen. Dieser Herausforderung nehmen sich unter anderem die Erdsystemwissenschaften an, die damals gerade begannen, interdisziplinär zusammenzuarbeiten.

2014 veröffentlichte der 'Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen' (WBGU), dem auch Hans-Otto Pörtner angehört, das „[Konzept planetarischer Leitplanken](#)“. Es zielt darauf ab, globale Entwicklung – im Sinne von Fortschritt – zu ermöglichen, ohne die natürlichen Lebensgrundlagen zu zerstören. Die Autor:innen definieren Schadensgrenzen, die zu überschreiten intolerable und irreversible Folgen nach sich ziehen würde.

Auch die Risikoanalysen im 6. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, Weltklimarat) basieren darauf, dass Forschende verschiedener Disziplinen Risikoschwellen für Teile des Erdsystems definieren, die von Klimaveränderungen beein-

flusst werden. Dazu zählen weltweit marine, terrestrische und Süßwasser-Ökosysteme mit ihrer Biodiversität. Die Forschenden bewerten zum einen deren Gesundheit und Produktivität, die Mortalität von Menschen, Tier-, Pflanzen- und mikrobieller Arten. Zum anderen betrachten sie die Ernährungssicherheit, Infrastruktur und Funktionalität menschlicher Gesellschaften. Dabei stellen sie fest, dass viele Systeme und Regionen bei etwa 1,5°C globaler Erwärmung in einen Bereich hohen Risikos gelangen, an Funktionalität einzubüßen. Diese Befunde bestärken das Pariser Abkommen 2015, nach dem dieses Maß der globalen Erwärmung durch menschliche Einflüsse möglichst nicht überschritten werden sollte.

Vom Konzept zum Handeln

Jeder der beschriebenen Ansätze hat seine Stärken und Schwächen. Allen gemeinsam ist eins: „Diese Konzepte helfen, das Augenmerk auf begrenzte Ressourcen, auf die natürlichen Lebensgrundlagen und auf die Lebensbedingungen des Menschen und der heutigen Natur zu richten“, sagt Hans-Otto Pörtner. Die Grenzen der Ressourcen des Planeten anzuerkennen, heißt, mit limitierten Mengen haushalten zu lernen. Es erfordert ein Bewusstsein für die endliche Menge an Wasser, das verschmutzt und umgeleitet werden darf; für die endliche Menge an Kohlenstoff, der verbrannt werden darf; die endlichen Mengen an Phosphor und Stickstoff, die der Mensch in die Umwelt freisetzen darf; und für endliche Mengen an Energie, Nahrung und Material, die der Mensch aus den natürlichen Ökosystemen für seine Zwecke abzweigen kann. Konzepte wie das der Planetaren Grenzen oder der Klimarisiken sind deshalb nicht nur in der Forschung relevant. Sie prägen gesellschaftliche Diskurse um Umwelt- und Klimaschutz und haben Eingang gefunden in juristische, ökonomische und sozialwissenschaftliche Diskussionen sowie politische Entscheidungsprozesse.

Rechtlicher Rahmen für Ressourcennutzung

Das Bewusstsein für begrenzte Budgets – sei es an Kohlenstoffemissionen, Nitratfreisetzung oder Süßwassernutzung – wirkt



unmittelbar die Frage nach [gerechter Verteilung](#) der planetaren Ressourcen und ökologischer Leistungen auf. Die Weltgemeinschaft hat dafür Sorge zu tragen, dass alle Menschen jetzt und künftig auf einem sicheren, stabil funktionierenden Planeten leben. Einen rechtlichen Rahmen dafür können die beschriebenen Risikokonzepte anleiten. Sie heben den kollektiven Charakter und die Begrenztheit irdischer Ressourcen und Lebensbedingungen hervor, auf die Menschen weltweit gleichermaßen angewiesen sind. Bestandteile des Erdsystems wie zum Beispiel die Regenwälder des Amazonas oder die Permafrostböden des Nordens bekommen den Stellenwert globaler Gemeingüter.

Wirtschaften innerhalb der Grenzen

Das Verständnis begrenzter natürlicher Ressourcen und Kapazitäten hat das Modell der [Donut-Ökonomie](#) hervorgebracht. Es beschreibt, wie die weltweite Wirtschaft einerseits durch die Planetaren Grenzen und andererseits durch notwendige soziale Grundlagen flankiert ist. „Wo es biophysikalische Obergrenzen gibt, muss es auch ein soziales Fundament geben“, schreiben dazu die Autoren des 2023 erschienenen [zweiten Updates der Planetaren Grenzen](#). Die soziale Grundlage ist anhand von Kriterien der Gleichstellung und der Gerechtigkeit zu definieren. Nur im Rahmen dieser Unter- und Obergrenzen kann gerechtes und sicheres Wirtschaftshandeln stattfinden, das den Planeten als intakten Lebensraum bewahrt. Dass es nicht einfach ist, diesen Handlungsraum einzuhalten, zeigt eine [Studie aus dem Jahr 2021](#): Wohlhabende Länder haben zwar oft höhere soziale Standards, verbrauchen dafür aber übermäßig viel Ressourcen – sie überschreiten die Obergrenze des Donuts. Ärmere Länder dagegen tun sich tendenziell schwerer, soziale Grundbedarfe zuverlässig zu erfüllen.

Gesundheit und Nachhaltigkeit

Im Gesundheitsbereich ist das Konzept der Planetary Health populär geworden. Das multidisziplinäre Forschungsgebiet ist an ein Verständnis Planetaren Grenzen angelehnt und vereint die Sicht auf die begrenzten Ressourcen und Kapazitäten unseres Planeten mit dem Blick auf die Gesundheit des Menschen. Aus der Zusammenschau haben Wissenschaftler:innen beispielsweise die Ernährungsweise der [‘Planetary Health Diet’](#) entwickelt. Sie ist reich an pflanzlichen Proteinen und fleischarm. Dadurch soll sie der Gesundheit zugute kommen und gleichzeitig das Klima, die Biodiversität und die Umwelt schonen. Auch für die Stadtplanung und -entwicklung ergeben sich aus der Planetary-Health-Perspektive wertvolle Erkenntnisse, etwa wenn es um Luftverschmutzung, Grünflächennutzung oder Baumaterialien geht.

Für die Nachhaltigkeitsforschung ist das Konzept der Planetaren Grenzen ein Leitbild, das allerdings verschiedene Herausforderungen birgt. Um im Sinne der Governance, Justiz oder Ökonomie anwendbar zu werden, müssen die Risikogrenzen von der globalen Skala in konkrete Ziele oder Grenzwerte auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene übersetzt werden. Das erfordert ein detaillierteres Verständnis der Zusammenhänge menschlicher Einflüsse auf allen Ebenen.

Ausrichtung der Politik auf den Erhalt der Lebensgrundlagen

Zunehmend spiegelt sich die Wahrnehmung, dass die Ressourcen unseres Planeten endlich sind, auch in internationaler Politik wider. Der globalen Perspektive der Vereinten Nationen (UN) entsprechend, hat die Betrachtung von Risiken und ihrer Grenzen beispielsweise in UN-Rahmenwerke und Konventionen Eingang gefunden. Das in der UN-Biodiversitätskonvention festgelegte Ziel, 30 Prozent der weltweiten Flächen unter Schutz zu stellen, wird zum Beispiel durch die Beachtung der Planetaren Grenze der Landsystem-Veränderung ([siehe S. 17](#)) gestützt – auch wenn es für Land- und Ozeanflächen gilt. „Diese Zielgröße offenbart allerdings auch die Schwäche eines global einheitlichen Grenzwertes für Flächennutzung“, sagt Hans-Otto Pörtner. „Im Grunde ist es eine recht willkürliche Festlegung. Welchen räumlichen Schutz Biodiversität wirklich braucht, ist wissenschaftlich noch zu erarbeiten.“

Um die Lebensbedingungen der Menschen und ihre natürlichen Grundlagen innerhalb zuträglicher Grenzen zu erhalten, sollten soziale und ökologische Resilienz miteinander einhergehen. Auf diesem Verständnis basieren unter anderem die Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDGs), die von den Vereinten Nationen 2015 verabschiedet wurden und die Grundlage der [Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie](#) bilden. Entscheidungstragende in der Politik und Forschende beschäftigen sich mit der Frage, wie die SDGs innerhalb der Planetaren Grenzen zu erreichen sind. Auch das europäische Umweltaktionsprogramm (Environment Action Programme, EAP) fußt auf dem Verständnis Planetarer Grenzen. Und einige Regionen und Städte haben ihre Umweltziele daran ausgerichtet, die Planetaren Grenzen einzuhalten.

Während die Beschreibung der Planetaren Grenzen wissenschaftlich ständig weiterentwickelt wird, hat der Begriff also Einzug gehalten in viele Bereiche der Gesellschaft, Politik, Wirtschaft. Wissenschaftliche Konzepte wie die ‘Planetaren Grenzen’ oder die ‘Leitplanken’ des WBGU können als übergreifende Leitlinien wichtige Transformationen anleiten, die es braucht, um den Planeten Erde als sicheren Lebensraum – auch – für den Menschen zu erhalten.



Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen © United Nations

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Prof. Dr. Hans-Otto Pörtner](#)
Physiologe und Meeresbiologe
am Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und
Meeresforschung (AWI)

Der Klimawandel als planetare Belastungsgrenze

Hitzewellen, Überflutungen und Dürren: Die Folgen des voranschreitenden Klimawandels machen sich auch in Europa bemerkbar. Mit jedem Zehntelgrad Celsius Erwärmung steigt die Gefahr von abrupten und irreversiblen Veränderungen des Erdsystems. Bereits eine Zunahme von weniger als 1,5 Grad Celsius erhöht die Risiken gefährlicher Umweltveränderungen deutlich. Die planetare Grenze gilt als weit überschritten.

Die Energie für physikalische Prozesse und das Leben auf der Erde stammt von der Sonne. Das Klima auf unserem Planeten ist Ausdruck der Menge, der Verteilung und der Gesamtbilanz eintreffender und ausgehender Energie. Unterschiede in Temperatur und Luftdruck, die aus der Energieverteilung resultieren, treiben globale Strömungen in den Ozeanen und der Atmosphäre an. Ihre fein abgestimmten Dynamiken haben die Entstehung von Leben überhaupt erst ermöglicht.

Der globale Temperaturanstieg droht, diese Dynamiken zu stören und die Lebensgrundlagen vieler Menschen zu vernichten. Besonders betroffen sind Küsten- und Inselregionen sowie solche Gebiete, die schon heute unter Trockenheit leiden. Aber auch die Lebensbedingungen für Stadtbewohner:innen ändern sich dramatisch.

Fast alle Staaten der Erde haben sich 1992 in der [UN-Klimarahmenkonvention](#) darauf verständigt, den vom Menschen verursachten Klimawandel aufzuhalten. Zentrales Ziel der Konvention: Den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid (CO₂) zu reduzieren, also des Treibhausgases, das maßgeblich zur Erderwärmung beiträgt. So wollen sie das Risiko gefährlicher Verwerfungen im Erdsystem eindämmen. Über 30 Jahre nach der Unterzeichnung liegt die atmosphärische Konzentration von CO₂ heute deutlich höher als je zuvor. Der Grund sind stetig steigende Emissionen aus Energieproduktion, Verkehr, Landwirtschaft und anderen Lebensbereichen.

Sengende Hitze, anhaltende Dürre, riesige Waldbrände oder auch Flutkatastrophen: Extremwetterereignisse und ihre Folgen deuten weltweit darauf hin, wie menschliches Verhalten den Planeten und seine Bewohnenden an Belastungsgrenzen führt. Das Konzept der Planetaren Grenzen beschreibt den Klimawandel als einen der wichtigsten Faktoren für unsere Zukunft – neben dem Verlust der Biodiversität ([siehe S. 19](#)) und der Verbreitung neuer Substanzen wie Chemikalien und Plastik in der Umwelt ([siehe S. 6](#)).

Der Treibhauseffekt: Was den Klimawandel antreibt

Treiber des Klimawandels ist die steigende Konzentration von Treibhausgasen wie CO₂, Methan und Lachgas in der Atmosphäre. Wie eine Dämmschicht oder das Glasdach eines Gewächshauses halten sie Wärme an der Erdoberfläche. Wärme, die durch Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche entsteht, kann immer schlechter durch die Atmosphäre entweichen. Die Energiebilanz des Erdsystems verschiebt sich. Fachleute sprechen von einem erhöhten Strahlungsantrieb.

Der Strahlungsantrieb wird neben der Konzentration von Treibhausgasen maßgeblich von der Albedo der Erdoberfläche bestimmt. Der Begriff Albedo bedeutet soviel wie 'Weißheit' und ist das Maß dafür, welchen Anteil der einfallenden Sonnenenergie eine Oberfläche aufnimmt. Je heller eine Oberfläche ist, desto stärker reflektiert sie das Licht der Sonne. Dunklere Flächen nehmen mehr Lichtstrahlen auf und wandeln sie in Wärme um. Was das im Kontext des Klimawandels bedeutet, wird in der Nordpolarregion besonders deutlich: Helle Eisflächen werfen einen Großteil der Sonnenstrahlung zurück. Deshalb sind eisbedeckte Polarregionen selbstkühlend. Je mehr Eisflächen durch die global steigenden Temperaturen abschmelzen, desto mehr dunkle Meeresoberfläche liegt frei. Sie nimmt mehr Energie auf, die zum Teil in Form von Wärme im Erdsystem verbleibt. Der Effekt der Erwärmung ist also selbstverstärkend.

Den Treibhauseffekt an sich hat es schon immer gegeben. Er ermöglicht Leben auf der Erde, an deren Oberfläche ganz ohne Treibhausgase eine Temperatur von etwa -18 Grad Celsius herrschen würden. Doch die massenhafte Freisetzung von Gasen wie CO₂ und Methan durch den Menschen führt heute zu einer schnelleren Aufheizung als je zuvor in der Erdgeschichte – mit unabsehbaren Folgen. Globale Meeres- und Luftströmungen ändern ihre Dynamik und damit regionale Ausprägungen des Klimas. Lebensbedingungen für Pflanzen und Tiere zu Wasser, zu Land und in der Luft wandeln sich dramatisch.



Grenzen deutlich überschritten

Im Konzept der Planetaren Grenzen haben Wissenschaftler:innen den Höchstwert der atmosphärischen CO₂-Konzentration für einen sicheren Handlungsspielraum auf 350 ppm festgelegt (Parts per Million – Anzahl der CO₂-Moleküle pro Gesamtzahl aller Teilchen in der Atmosphäre). Die tatsächlich gemessene CO₂-Konzentration lag im weltweiten Mittel des Jahres 2023 nach Angaben der amerikanischen [National Oceanic and Atmospheric Administration](#) (NOAA) bei 420 ppm. Und nicht nur ist die Konzentration in der Atmosphäre zu hoch, sie steigt auch noch immer – so schnell wie nie zuvor.

Den Grenzwert für die Erhöhung des Strahlungsantriebs beziffern Forschende mit einem Watt pro Quadratmeter gegenüber dem vorindustriellen Niveau. Der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) meldet in seinem [Sachstandsbericht von 2023](#) einen tatsächlichen Anstieg von knapp drei Watt pro Quadratmeter verglichen mit dem Jahr 1750.

Beide Grenzwerte für ein sicheres Klima auf der Erde sind derzeit also deutlich überschritten. Das kann teils abrupte und vor allem irreversible Veränderungen im gesamten Erdsystem zur Folge haben. Weltweit aufgenommene Wetterdaten zeigen, dass 2024 das heißeste Jahr seit dem Beginn der Wetteraufzeichnungen war. Laut der [Weltwetterorganisation WMO](#) reiht sich das Jahr damit in eine Serie von Rekordjahren des vergangenen Jahrzehnts.

Zudem war 2024 mit sehr großer Wahrscheinlichkeit das erste Jahr, in dem die weltweite Durchschnittstemperatur an der Erdoberfläche über 1,5 Grad höher lag als im Durchschnitt der Jahre 1850 bis 1900. Bereits bei einer Temperaturerhöhung von weniger als 1,5 Grad Celsius können Rückkopplungsprozesse im System zum Tragen kommen und Kippunkte des Klimasystems erreicht werden. Die globale Erwärmung und ihre Folgen verschärfen sich weiter, sie werden zunehmend unaufhaltbar und sind nicht mehr umkehrbar.

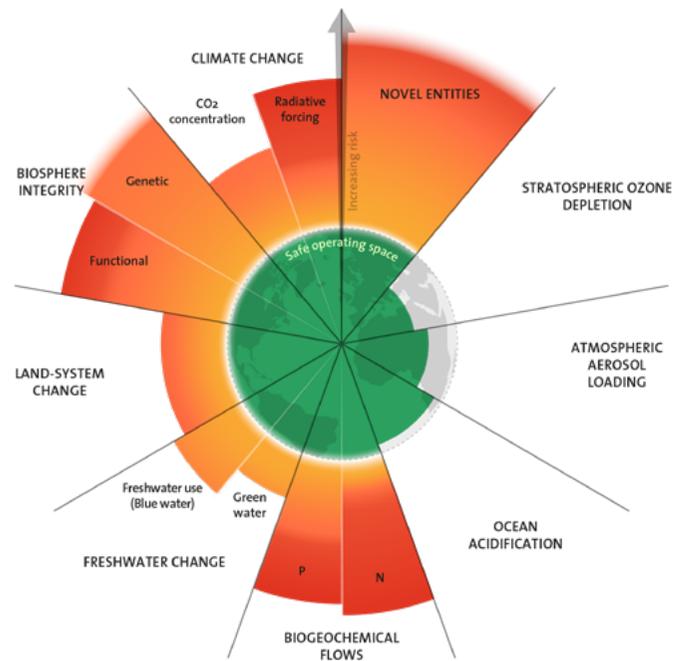
Können wir den Wandel aufhalten?

Um die planetare Grenze für ein gesichert menschenfreundliches Klima nicht immer weiter zu überschreiten, müssen wir den anthropogenen Ausstoß von Kohlendioxid so schnell wie möglich auf Netto-Null reduzieren.

Der wichtigste Pfad um CO₂-Emissionen zu verringern, ist, Energie aus Windkraft, Solaranlagen, Wasserkraft oder Geothermie zu nutzen. Und wo es unvermeidbar ist, Treibhausgase freizusetzen, müssen sie wie im natürlichen Kreislauf wieder aus der Atmosphäre

entfernt werden. Dafür können wir natürliche CO₂-Senken wie Wälder, Moore und gesunde Ozeane stärken. Zusätzlich könnten neue Technologien helfen, Treibhausgase aus der Atmosphäre zu binden und unschädlich zu machen.

Höchste Priorität hat jedoch die Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Gesellschaften müssen schnellstmöglich klimaneutrale Industrien, Handel und Lebensstile entwickeln, um langfristig in einen sicheren Handlungsrahmen für die menschliche Zukunft zurückzukehren. Aufgabe nationaler und internationaler Politik ist es, den rechtlichen Rahmen für diese Entwicklungen zu gestalten.



Darstellung der 9 Planetaren Grenzen © Azote for Stockholm Resilience Centre, based on analysis in Richardson et al 2023

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Dr. Tido Semmler](#)
Senior Scientist Klimadynamik
am Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und
Meeresforschung (AWI)

Chemikalien und Plastik: Unvorhergesehene Langzeitfolgen

Die Menschheit produziert und verbreitet fast 350.000 Substanzen, die das Potenzial haben, Prozesse des Erdsystems zu verändern und die Stabilität der Lebensräume zu gefährden. Die Grenze, innerhalb derer Leben auf der Erde den Eintrag menschengemachter Stoffe verkraften kann, ist deutlich überschritten.

Sie umgeben uns im Alltag, stecken in Konsumgütern aller Art, von Haushaltswaren über Elektrogeräte und Textilien bis zu Nahrungsmitteln: Chemikalien. Sie sind ein Grundstock der Industrie, der Landwirtschaft, des Energie- sowie des Gesundheitssektors heutiger Gesellschaften.

Die Menschheit flutet den Planeten geradezu mit neuartigen Substanzen, viele davon von Menschen erfunden, andere der Natur nachgeahmt und synthetisch hergestellt. Das Vorkommen synthetischer Substanzen in allen Sphären des Erdsystems markiert das Zeitalter des Menschen – von vielen Forschenden als [Anthropozän](#) bezeichnet.

Ungeahnte Folgen

Auf oft unvorhergesehenen Pfaden dringen chemische Substanzen in alle Sphären des Erdsystems ein und entfalten ungeahnte Wirkung. Die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) haben im 20. Jahrhundert ein eindrückliches Exempel statuiert: Die nützlichen und zunächst für harmlos gehaltenen menschengemachten Substanzen entpuppten sich als potente Schadstoffe. Sie gelangten in die Atmosphäre und rissen Löcher in die schützende Ozonschicht – mit verheerenden Folgen für Mensch und Natur weltweit. Auch der Nachweis des Insektizids DDT in Fischen und [Eis des Nordpolarmeeres](#) oder die Funde von [Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen](#) (PFAS) im Schaum an deutschen Nord- und Ostseeküsten und vielen anderen Orten führen uns erneut vor Augen, mit welcher Dynamik sich chemische Substanzen verbreiten können. Sowohl DDT als auch die PFAS gelten als endokrine Disruptoren, die die natürliche Wirkung von Hormonen bei Tier und Mensch beeinflussen.

„Allein in Europa verursachen PFAS direkte Gesundheitsausgaben von jährlich 52 bis 84 Milliarden Euro“, sagt Melanie Bergmann, Polar- und Tiefseeforscherin am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) und Expertin für Plastikverschmutzung. Menschengemachte Substanzen können Lebewesen also direkt oder indirekt schaden, sie können ganze Lebensräume kontaminieren, und sie können geophysikalische und geochemische Erdsystemprozesse empfindlich stören.

Belastung auf lange Zeit

Das Konzept der Planetaren Grenzen beschreibt den Eintrag menschengemachter Substanzen mit unbekannter Wirkung und Verbreitungsdynamik als eine der schwersten Belastungen für das Erdsystem, und als einen wichtigen Risikofaktor für seine Stabilität. Wie das Beispiel der FCKW zeigt, wird die schädliche Wirkung einer Substanz möglicherweise erst erkennbar, wenn sie sich bereits weltweit entfaltet. Derart weitreichende Effekte können nicht ohne Weiteres rückgängig gemacht werden, insbesondere dann nicht, wenn die verursachenden Substanzen langlebig sind. Sie beeinflussen das Leben in einem Ökosystem oder menschlichen Gesellschaften langfristig, verändern es unter Umständen dauerhaft und unumkehrbar. Man spricht deshalb auch von Legacy- oder Ewigkeitschemikalien – einfacher gesagt: Altlasten, deren Auswirkungen wir nachfolgenden Generationen aufbürden.

Produktion steigt, Sicherheit bleibt ungewiss

Heute sind hunderttausende von Substanzen und Substanzgemischen weltweit im Umlauf – Berechnungen ergeben zwischen 144.000 und über 350.000 von ihnen. Die Produktionsmenge der chemischen Industrie hat sich im Zeitraum von 2000 bis 2017 fast verdoppelt. Und bis 2030 soll sich das Handelsvolumen im Vergleich zu 2017 noch einmal annähernd [verdoppeln](#), auf dann 6,6 Billionen Euro. Die wenigsten Chemikalien werden vor der Markteinführung daraufhin untersucht, ob sie die Gesundheit von Mensch oder Umwelt beeinträchtigen. Erst recht nicht wird geprüft, ob sie Prozesse des Erdsystems beeinflussen. Von den Chemikalien, die beispielsweise im Zuge der europäischen Chemikalienverordnung REACH registriert wurden, waren 80 Prozent bereits zehn Jahre oder länger im Umlauf, ohne jemals auf ihre Sicherheit geprüft worden zu sein. Sicherheitsprüfungen, soweit durchgeführt, konzentrieren sich meist auf eng definierte Toxizitätskriterien. Die schiere Anzahl und wachsende Vielfalt menschengemachter Substanzen, die zudem miteinander in Wechselwirkung stehen, machen es unmöglich, die Risiken für das Erdsystem zu beurteilen, die mit ihrer Freisetzung einhergehen.



Ein weiteres Problem ist die enge Verflechtung von chemischer und fossiler Industrie: Erdöl liefert sowohl Grundstoffe als auch Energieträger für die Synthese vieler Chemikalien. „Und gerade das günstige Fracking Gas aus den USA wird zunehmend auch für die Plastikproduktion verwendet“, ergänzt Melanie Bergmann. Der stetig steigende Verbrauch von Plastik und chemischen Substanzen verfestigt auf diesem Weg die Abhängigkeit moderner Gesellschaften von fossilen Bodenschätzen – zum Leid von Klima und Umwelt.

Die Grenze: Null Prozent Unsicherheit

Dass die Einflüsse menschengemachter Substanzen auf das Erdsystem an eine Grenze der Belastbarkeit stoßen, war den Forschenden um Johan Rockström bereits klar, als sie das Konzept der Planetaren Grenzen im Jahr 2009 veröffentlichten. Angesichts der vielen Unbekannten und Unsicherheiten mit Blick auf die Anzahl synthetischer Stoffe, deren Wirkungen, Verbreitungsdynamik und Langlebigkeit zerbrachen sich Forschende jedoch lange den Kopf darüber, welche Werte diese Grenze definieren sollten. Die einzig wirklich sichere Möglichkeit, stabile Lebensbedingungen zu garantieren, wäre, gar keine menschengemachten Substanzen von unbekannter oder schädlicher Wirkung auf den Planeten freizusetzen. In einem Update des Konzepts aus dem Jahr 2023 legen die Forschenden als Grenzwert deshalb den Anteil ungeprüfter Substanzen auf null Prozent aller in Umlauf gebrachten neuartigen, menschengemachten Entitäten fest. Dazu zählen neben Chemikalien auch radioaktive Materialien und genetisch modifizierte Organismen. Bei allen Unsicherheiten, die diese Definition des Grenzwertes mit sich bringt, wird klar ersichtlich: Der sichere Handlungsspielraum für die Menschheit ist derzeit bereits deutlich überschritten.

Schäden durch Kunststoff

Besonderes Augenmerk richteten Forschende in den vergangenen Jahren auf Plastik als neuartigen, menschengemachten Stoff mit hochproblematischen Auswirkungen auf das Erdsystem. Kunststoffe und ihre Bestandteile haben sich nach Jahrzehnten wachsender Produktion, Nutzung und (sorgloser) Entsorgung über den ganzen Planeten verbreitet. Allein die Herstellung von Plastik erzeugt weltweit derzeit über fünf Prozent des jährlichen CO₂-Ausstoßes, mehr als der Flugsektor. Und Abfälle aus Produktion und Entsorgung entfalten zunehmend Schadwirkungen auf verschiedene Sphären und Prozesse der Erdsystems. Meerestiere ersticken an Plastikmüll, Mikroplastik belastet Ökosysteme entlang der gesamten Nahrungskette – von Mikroorganismen über Böden, die Luft und den Ozean bis hin zu Nutztieren und den Menschen selbst.

„Die Verschmutzung mit Plastik verschärft die Wirkung anderer Faktoren auf alle Planetaren Grenzen“, stellen Forschende aus Schweden, Dänemark und den USA in einer Fachpublikation von 2024 fest.

Reduktion wirksamer als Recycling

„Auch bei Kunststoffen muss das Essential Use System angewendet werden, um die Produktion von überflüssigen Produkten zu vermeiden. Und wir müssen re-use-Systeme aufbauen, die sich auch finanziell an der EU Abfall Hierarchie orientieren“, ergänzt Melanie Bergmann. Die EU-Abfallhierarchie ist die gesetzlich festgelegte Rangfolge für den Umgang mit Abfällen. Sie umfasst fünf Stufen, wobei die Vermeidung höchste Priorität hat – vor Wieder- und Weiterverwertung sowie der Beseitigung. Eine wichtige Bedingung, um höhere Recyclingquoten zu erreichen und Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen: Die chemischen Zusammensetzungen müssen vereinfacht, entgiftet und transparent gemacht werden, damit Kunststoffe sich sicher in ihre einzelnen Inhaltsstoffe zerlegen lassen. Auch Kunststoffe, die nach dem Stand der Technik gut recyclebar sind, sind nur begrenzt wiederverwendbar und das Recycling erfordert das 'Zufüttern' frischer Rohstoffe. Zudem sind die Prozesse energieaufwendig und können Mikro- und Nanoplastik freisetzen. „Gerade in Deutschland hängen wir leider sehr an dem Narrativ von Recycling als der Lösung der Plastikkrise. Das A und O sind aber die Reduktion der hergestellten Mengen sowie Maßnahmen, die sich an der Abfallhierarchie orientieren“, meint Bergmann. „Wir brauchen eine Begrenzung der Plastikproduktion, weil sie den Preis hochtreibt und so einen ökonomischen Anreiz liefert für echte Kreislaufwirtschaft oder Pfandsysteme und ähnliche vorgelagerte Maßnahmen gegen Plastikverschmutzung.“

Auf allen Handlungsfeldern gilt es angesichts der Schwemme an Chemikalien und ihrer weitgehend unvorhersehbaren Auswirkungen, jetzt voranzukommen. Im Konzept der Planetaren Grenzen ist die Freisetzung neuartiger, menschengemachter Substanzen eine entscheidende Größe. Sie stören insbesondere Prozesse der Biosphäre und des Klimas, also der beiden Bereiche, die Wissenschaftler:innen als Kernkomponenten der Planetaren Grenzen identifiziert haben und die mit allen anderen Bereichen eng verwoben sind.

Was tun? Sicheres Design, eng definierter Einsatz, begrenzte Mengen

Die Fälle von FCKW, der PFAS und langlebiger organischer Schadstoffe wie DDT zeigen: Einmal freigesetzt – ob bewusst, ungewollt oder gar unbemerkt – können synthetische Substanzen Wirkungen von globaler Tragweite entfalten, die nicht leicht einzudämmen sind. Die Menschheit hat nach Ermessen der Wissenschaft den sicheren Handlungsspielraum mit Blick auf die Freisetzung von Chemikalien längst verlassen. Was kann helfen, die Kontrolle wiederzuerlangen?

- Verbote, wie 1987 im Protokoll von Montreal für FCKW beschlossen, verhindern, dass immer größere Mengen gefährlicher Stoffe in die Umwelt gelangen. Voraussetzung für ein Verbot ist allerdings, dass die schädliche Wirkung erkannt wurde; es ist also bereits Schaden entstanden.
- Chemikalien mit bekannter Schädwirkung sollten – entsprechend dem 'Essential Use'- Konzept der EU-Kommission – ausschließlich zum Einsatz kommen, wenn sie unverzichtbar und nicht ersetzbar sind.
- Neu entwickelte synthetische Substanzen sollten schon im Design auf Sicherheit und Nachhaltigkeit ausgelegt sein. Wichtig ist dabei, Designs und Sicherheitsprüfungen zu entwickeln, die planetare Dimensionen der potentiellen Wirkung, des chemischen Verhaltens und der Verbreitung einer Substanz berücksichtigen. Und nicht nur die Produkte, auch die Herstellungsverfahren müssen entsprechende Sicherheitskriterien erfüllen.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Dr. Melanie Bergmann](#)

Biologin am Alfred-Wegener-Institut
Helmholtz-Zentrum für Polar- und
Meeresforschung (AWI)

Planetare Grenze Aerosolbelastung: Menschenverursachte Aerosole reduzieren

Kleinste Schwebeteilchen in der Luft haben vielfältige Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen, auf Ökosysteme und auf das Klima. Nicht immer sind sie eindeutig 'gut' oder 'schlecht'. Wieviel Aerosole verkraftet das Leben auf der Erde?

Schwebstoffe in der Atmosphäre haben einen Einfluss darauf, wieviel Energie aus der Sonnenstrahlung auf die Erdoberfläche trifft. Denn wie ein Sonnenschirm werfen sie Schatten. Helle Partikel wie beispielsweise Sulfat aus Industrie- und Schiffahrtsabgasen oder Seesalz streuen und reflektieren Sonnenstrahlen. Der kühlende Schattenwurf dieser Partikel maskiert zu einem gewissen Grad die Erderwärmung im Zuge des Klimawandels. Dunkle Teilchen wie Ruß nehmen dagegen Strahlung auf und halten sie in Form von Wärme in der Atmosphäre. Ähnlich wie unter einem dunklen Sonnenschirm erwärmt sich eine Luftschicht, die dunkle Schwebstoffe enthält. Außerdem verringern dunkle Teilchen die Rückstrahlkraft heller Flächen, die Albedo. Rußpartikel reduzieren beispielsweise die Albedo des Grönländischen Eisschildes und begünstigen dadurch die Erwärmung und in Folge Schmelzprozesse.

Neben ihrer Wirkung auf den Energiehaushalt des Erdsystems haben Schwebstoffe vielfältige Auswirkungen auf das Leben. Je nachdem, in welcher Luftschicht sie auftreten, beeinflussen sie Wetter- und Klimaprozesse sowie Funktionen in Ökosystemen. Und insbesondere in Bodennähe können sie die Gesundheit von Menschen und Tieren direkt schädigen.

Was sind Aerosole?

Als Aerosole bezeichnet man Schwebeteilchen aus Feststoffen oder Flüssigkeiten, die auf natürlichem Wege oder im Zuge menschengesteuerter Prozesse in die Luft gelangen. Die winzigen Partikel werden entweder direkt freigesetzt, oder sie entstehen durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre. Zu den primären, also direkt freigesetzten, Aerosolen gehören zum Beispiel Wüstenstaub, Seesalz, Pollen oder Rußpartikel aus Verbrennungsprozessen. Ein Beispiel für sekundäre Aerosole sind Stickstoff- und Schwefelverbindungen, die sich aus gasförmigen Vorläufer-substanzen bilden. Verkehr, Industrie und auch Landwirtschaft sind wichtige Quellen für Aerosole und aerosolbildende Gase.

Unterschied zwischen Nord und Süd beeinflusst Monsun

Die Autor:innen der Planetaren Grenzen betrachten als Maß für die Aerosolbelastung der Atmosphäre die AOD (engl: Aerosol Optical Depth; Aerosoloptische Dicke). Die AOD gibt die Beschattungsleistung durch Aerosole an, und zwar zusammengenommen über alle Luftschichten. In die AOD fließt der Effekt aller Schwebeteilchen ein, unabhängig davon, welcher Art sie sind und in welcher Höhe sie sich befinden. Änderungen in der AOD korrelieren mit verschiedenen klimarelevanten Größen wie der Temperatur, der Wolkenbildung und der Niederschlagsmenge. 2023 haben die Autor:innen den Grenzwert weiterentwickelt. Statt eines globalen Mittelwertes für die maximal zulässige AOD – also den höchsten zulässigen Gehalt an Aerosolen in der Atmosphäre – definierten sie einen Höchstwert für den Unterschied in der AOD zwischen Nord- und Südhalbkugel. Die Begründung: Die wachsende Differenz in der AOD, bedingt durch mehr menschenverursachte Emissionen auf der Nordhalbkugel, hat dazu beigetragen, dass weltweite Niederschlagsmuster sich verändern. Die Monsunniederschläge über Land nahmen dadurch in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ab. Treiber dieser Entwicklung ist der Beschattungseffekt der Aerosole: Die stärkere Beschattung durch Aerosole führt auf der Nordhalbkugel zu niedrigeren Temperaturen. Dadurch verschieben sich die Regionen, in denen Monsun mit seinen charakteristischen Winden und saisonalen Niederschlägen auftritt.

Eine Grenze für alle?

„Die Definition der Grenze stützt sich auf die exemplarische Erforschung einzelner Klimasysteme, des indischen und westafrikanischen Monsuns, um einen greifbaren, weltweit einheitlichen Grenzwert herzuleiten“, ordnet Dr. Ali Hoshyaripour, Aerosolforscher am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das Vorgehen der Autor:innen ein. Denn der Kern des Planetare-Grenzen-Konzepts (siehe S. 2) ist eben, global geltende Grenzwerte zu definieren für Bereiche des Erdsystems, auf deren Funktion Leben auf der Erde



zwingend angewiesen ist. So soll klar werden: Ist diese Grenze überschritten, sind wir alle in Gefahr. Dass die Aerosolbelastung der Atmosphäre ein weltweites Problem ist, dem die Menschheit mit grenzübergreifenden Regeln und Maßnahmen entgegenwirken muss, ist wissenschaftlicher Konsens. Ob der Grenzwert der Differenz zwischen Süd- und Nordhalbkugel dafür sinnvoll und hinreichend Orientierung bietet, diskutieren Fachleute durchaus kontrovers. „Der Weltklimarat IPCC unterstützt die Hypothese, dass Unterschiede in der Aerosoloptischen Dicke zwischen den Hemisphären Auswirkungen auf Monsunsysteme haben“, sagt dazu Hoshyaripour. „Das IPCC weist aber auch darauf hin, dass Unsicherheiten in den Modellen und interne Klimaschwankungen wie das El Niño-Phänomen die genaue Stärke dieses Effekts beeinflussen können.“ Vor diesem Hintergrund bleibe zu diskutieren, ob ein fester Grenzwert auf Basis des Zusammenhangs von AOD und Monsundynamik eine geeignete Zielgröße ist, um politische und gesellschaftliche Entscheidungen anzuleiten.

„Grundsätzlich ist es quasi unmöglich, einen global einheitlichen Grenzwert für den Aerosolgehalt der Atmosphäre festzulegen“, meint Hoshyaripour. Denn wie die kleinen Teilchen wirken, unterscheidet sich erheblich je nach Art und je nachdem, in welcher Luftschicht sie auftreten.

„Eine AOD von 0,3, die durch bodennahe Feinstaubpartikel bedingt ist, zeigt eine katastrophale Luftqualität an“, erklärt Hoshyaripour. Basiert der gleiche AOD-Wert auf dem Schattenwurf von Partikeln in höheren Luftschichten, etwa der Freien Troposphäre, hat er keine unmittelbare Bedeutung für die menschliche Gesundheit. Dort beeinflussen die Partikel eher Wetterprozesse wie beispielsweise die Wolkenbildung.

Gut oder schlecht – nicht immer zu unterscheiden

Und es gibt Fälle, in denen Aerosole einerseits Aspekte des Klimawandels zugunsten des Menschen beeinflussen, gleichzeitig aber direkt oder indirekt schlecht für dessen Gesundheit sind. Forschende des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, bringen beispielsweise die Reduktion von Abgasen aus dem [Schiffsverkehr in Verbindung mit stärkerer Erderwärmung](#). Schwefel- und Stickstoffverbindungen in den Abgasen beschatten nämlich die Erdoberfläche und begünstigen zudem die Bildung bestimmter Wolken, welche die Erde zusätzlich kühlen. Werden weniger Abgase ausgestoßen, wird dieser Kühlmechanismus schwächer und die Erde erwärmt sich stärker.

Die gleichen Abgase führen aber auch zu saurem Regen und Überdüngung von Ökosystemen, zum Leid von Mensch und Natur. Und schließlich ist es eindeutig im Interesse der menschlichen Gesund-

heit, die ruß- und feinstaubhaltigen Schiffsemissionen zu reduzieren. „Bei politischen und gesellschaftlichen Entscheidungen muss man deshalb möglichst alle Wirkungen eines bestimmten Stoffes und die verschiedenen relevanten Mechanismen einbeziehen und sorgfältig abwägen“, mahnt Hoshyaripour. Und wenn eine Maßnahme, die unmittelbar der Gesundheit zugute kommt, negative Effekte auf das Klima habe, müsse diesen auf anderem Wege vorgebeugt oder entgegengewirkt werden.

Fazit: Menschenverursachte Aerosole reduzieren

Unterdessen entwickelt sich der Aerosolgehalt der Atmosphäre regional unterschiedlich und sehr dynamisch. Vielerorts gibt es einen Trend abnehmender Konzentration menschenverursachter Aerosole – insbesondere dadurch, dass weniger fossile Brennstoffe verheizt werden. Auch die sich wandelnden Klimabedingungen verändern Art und Zusammensetzung der verschiedenen Partikel in der Luft. Die Verödung von Landstrichen infolge von Dürren oder die Ausbreitung von Wüsten bedingen in manchen Regionen mehr Staub in der Luft; anderenorts ergrünen Wüstenregionen nach vermehrten Niederschlägen, so dass hier weniger Staub freigesetzt wird. Und während Emissionen aus Verkehr und Industrie tendenziell zurückgehen, gewinnt beispielsweise Ruß an Relevanz, der durch ausgedehnte Waldbrände häufiger in großen Mengen entsteht. „Und: Ob morgen oder nächstes Jahr ein Vulkan ausbricht und die AOD schlagartig großflächig erhöht, können wir ohnehin nicht beeinflussen“, fügt Hoshyaripour hinzu.

Für Aerosolforschende wie ihn gibt es also viel zu tun. Atmosphärenphysiker:innen, Biolog:innen, Mediziner:innen und viele mehr müssen zusammenarbeiten, um die komplexen und dynamischen Vorgänge in der Atmosphäre zu beschreiben und deren Auswirkungen auf Natur und Menschen abzuschätzen. Ein besonderer Fokus der Forschung und Politik sollte auf urbanen Gebieten liegen. „Hier befinden sich die meisten Quellen anthropogener Emissionen“, sagt Hoshyaripour. „Gleichzeitig leben hier besonders viele Menschen, auf deren Gesundheit sich die Emissionen unmittelbar und stark auswirken.“ Für ihn ist klar: Im Sinne des Umwelt- und Gesundheitsschutzes hat die Reduktion menschenverursachter Emissionen höchste Priorität. Egal, ob sie in Bodennähe direkt auf den Menschen wirken oder durch chemische Prozesse Ökosysteme schädigen: „Solche Aerosole, die die Luftqualität beeinträchtigen, müssen wir reduzieren, wo wir können.“

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Dr. Ali Hoshyaripour](#)
Institut für Meteorologie und
Klimaforschung
Karlsruher Institut für Technologie
(KIT)

Ozonschicht: Weltweite Erholung, Klimaeinflüsse in Polarregionen

Die Schäden an der Ozonschicht sind ein Beispiel für eine globale Umweltkatastrophe, die von Menschen verursacht wurde und durch gemeinsames Handeln aufgehalten werden konnte. Doch ihre Geschichte ist nicht zu Ende. Können wir die Planetare Grenze einhalten?

Licht und Wärme der Sonne ermöglichen Leben auf der Erde. Das Spektrum der Sonnenstrahlung umfasst aber auch für Menschen unsichtbares, sehr energiereiches ultraviolettes (UV-) Licht. Trifft es ungefiltert auf die Erdoberfläche, kann es das Erbgut von Menschen, Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen schädigen. Menschen und Tiere erleiden vor allem Schäden an Augen und Haut. Zudem bremsst UV-Strahlung die Photosynthese, den Prozess, in dem Pflanzen CO₂ binden und Sauerstoff produzieren. Vor den gefährlichen kurzwelligen UV-Strahlen schützt uns die natürliche Ozonschicht die etwa 15 bis 50 Kilometer über unseren Köpfen in der Stratosphäre liegt. Doch Abgase und Klimawandel gefährden den Schutzmantel der Erde.

Ozonloch über der Antarktis

In den 1980er Jahren machte das Ozonloch Schlagzeilen. Verursacht durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die als Treib- und Kühlmittel eingesetzt wurden, breitete es sich in jedem Frühling über der Antarktis aus. Entscheidend dafür sind die dort herrschenden niedrigen Temperaturen. Bei unter -78°C bilden sich die Polaren Stratosphärenwolken. Diese besonderen Wolken schaffen eine Oberfläche, auf der Abbauprodukte der FCKW bei Sonneneinstrahlung die Ozonschicht angreifen. Der winterliche Polarwirbel hält die polaren Luftmassen zusammen. Regelmäßig in den Monaten des polaren Frühjahrs dehnt sich das Loch in der Ozonschicht über der Südpolarregion aus. In den Sommermonaten bricht der Polarwirbel zusammen und einströmende ozonreichere Luftmassen aus den mittleren Breiten sorgen dafür, dass die Schicht sich wieder verdichtet.

Treffen die kurzwelligen UV-Strahlen Menschen und Tiere, fördern sie die Trübung der Linse. Schafzüchter in Südamerika berichteten in den 1980er Jahren von erblindeten Tieren. Auch bei Fischen wurde der Effekt beobachtet. Bei Menschen verursachen die Strahlen den grauen Star, fördern Sonnenbrand und begünstigen die Entstehung von Hautkrebs. Pflanzen verlieren durch hohe UV-Einstrahlung ihre Fähigkeit, CO₂ aufzunehmen, Biomasse zu produzieren und Sauerstoff abzugeben. Die Nahrungsgrundlage der Menschen schien grundsätzlich gefährdet, würde sich das Ozonloch weiter ausbreiten.

Langfristige Nachwirkungen

Die Forschung und das Engagement von Wissenschaftler:innen um den 2021 verstorbenen Paul Crutzen trugen damals maßgeblich dazu bei, dass 1987 das [Montrealer Protokoll](#) verabschiedet wurde: FCKW wurden weltweit geächtet. Dieses bedeutende völkerrechtliche Abkommen führte dazu, dass die Neuproduktion der menschengemachten Ozonkiller schnell reduziert und Alternativen entwickelt wurden. Doch die FCKW-Moleküle in der Atmosphäre sind sehr langlebig. Ihre Abbauprodukte wie Chlor greifen noch Jahrzehnte nach der Freisetzung die Ozonschicht an. So dauerte es bis ins 21. Jahrhundert, ehe die Ausdehnung des Ozonlochs nicht mehr zunahm. Etwa seit dem Jahr 2000 geht die Chlor-Konzentration in den entscheidenden Luftschichten langsam zurück. Wissenschaftler:innen erwarten für die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts, dass die Ozonschicht ihre Dichte von 1980 wieder erreicht.

Je nach Breitengrad ist die Ozonschicht über der Erde unterschiedlich dicht und dick. Das hat zum einen natürliche Gründe, die in den Mechanismen der Ozonbildung und in weltweiten Luftströmungen liegen. Zum anderen wirkt der Effekt der FCKW wie beschrieben insbesondere in der Kälte der polaren Stratosphäre. Das Konzept der Planetaren Grenzen ([siehe S. 2](#)) sieht für die Ozonschicht einen weltweit einheitlichen Grenzwert vor: Ihre Stärke soll im globalen Mittel mindestens 95 Prozent der Stärke im vorindustriellen Zeitalter betragen. „Über den Sinn so einer einheitlichen Grenze kann man diskutieren“, sagt Jens-Uwe Grooß, Stratosphärenforscher am Forschungszentrum Jülich. Denn in der Südpolarregion wird dieser Zielwert zwar jedes Jahr unterschritten. Im globalen Durchschnitt liegt der Wert jedoch darüber, wenn auch (noch) nicht auf der Höhe des vorindustriellen Vergleichswertes. Sind wir damit jetzt auf der sicheren Seite?

Neue Gefahren durch Klimawandel

Nicht ganz. Tendenziell wird das Ozonloch zwar seit fast 20 Jahren kleiner. Ein Teil der vor Jahrzehnten freigesetzten FCKW und ihrer Abbauprodukte, etwa Chlor, verbleiben aber bis heute in der Atmosphäre. Hinzu kommen neuere Einflüsse auf die Dynamik der Ozonschicht: Aufgrund des Klimawandels können zum Beispiel Waldbrände häufiger auftreten und riesige Flächen betreffen. Aufsteigender Ruß aktiviert verbliebene Chlormoleküle, sodass verstärkt Ozon abgebaut wird. Große Waldbrände können die Regeneration der Ozonschicht deshalb verzögern.

Klimawandel fördert Ozonabbau in der Arktis

Auch über der Arktis ist die Ozonschicht ausgedünnt. Forschende der [MOSAIC-Expedition](#) bestätigten im Frühjahr 2020 den signifikanten Ozonverlust in den Wintermonaten der Nordpolarregion. Auswertungen der Daten, die während der Expedition gesammelt wurden, ergaben: Der Trend zu höheren Ozonverlusten in den polaren Wintermonaten geht mit dem Klimawandel einher. Dieselben Treibhausgase, die zur weltweiten Erwärmung führen, sorgen für eine Abkühlung stratosphärischer Luftschichten. So verstärken sie auch in der Nordpolarregion den Ozonabbau im Frühjahr. Forschende unter anderem des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung [gehen davon aus](#), dass der saisonale Verlust von Ozon bis zum Ende dieses Jahrhunderts weiterhin auftreten wird und sogar noch schlimmer werden könnte. Die Folgen zeigen sich zeitweise bis in unsere Breiten. „Der arktische Polarwirbel driftet immer mal wieder über Mitteleuropa, sodass es auch in Deutschland jeweils im Frühjahr zu einigen Tagen reduzierter Ozonschicht kommen kann“, erklärt der Polarforscher und [MOSAIC-Expeditionsleiter Markus Rex](#).

Und nicht alle Schäden an der weltweiten Ozonschicht gehen auf FCKW zurück. Auch Stickstoffverbindungen beeinflussen die Entstehung und den Abbau von Ozon in verschiedenen Luftschichten. Beispielsweise werden Einflüsse von Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft auf die Dichte der Ozonschicht diskutiert. „Die Dynamiken in der Atmosphäre verändern sich im Zuge des Klimawandels in vieler Hinsicht“, fasst Jens-Uwe Grooß zusammen. „Auch wenn wir im Mittel eine Dichte der Ozonschicht wie im vorindustriellen Zeitalter erreichen, wird sie regional andere Eigenschaften haben als 1980 oder 1850.“



Eisberge im Arktischen Ozean © zheng / Adobe Stock

Was können wir tun?

Damit die Ozonschicht vollständig heilen und sie ihre natürliche Schutzfunktion erfüllen kann, müssen wir also nicht nur das – bisher erfolgreiche – Montrealer Protokoll strikt einhalten. Vielmehr gilt es, die komplexen Zusammenhänge weiter zu erforschen, die sich zwischen den verschiedenen Einflüssen des Menschen auf alle Sphären des Planeten entfalten. Der Klimawandel mit seinen vielfältigen, zum Teil noch unerforschten Auswirkungen ist vielleicht die größte Herausforderung, der die Menschheit jemals gegenüberstand. Die Erfolge des Montrealer Protokolls können uns Hoffnung machen, und beispielhaft Wege weisen, wie wir als Weltgemeinschaft Umweltprobleme konstruktiv bewältigen können.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Dr. Jens-Uwe Grooß](#)
Institute of Climate and Energy
Systems, Forschungszentrum
Jülich GmbH

Ozeane an der Grenze: Ökosysteme leiden

Meere dämpfen den Anstieg von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre. Doch diese Leistung geht auf Kosten maritimer Ökosysteme. Stoffgleichgewichte in den Ozeanen geraten aus der Balance – und viele Arten in Gefahr. Was können wir tun, um gegenzusteuern?

Das massenweise Verheizen fossiler Brennstoffe setzt binnen kürzester Zeit Kohlenstoffdioxid frei, das Jahrmillionen unter der Erde lagerte. Der Gehalt an Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Atmosphäre beträgt derzeit im weltweiten Mittel rund 420 ppm (Parts per Million). Die Konzentration liegt damit über 40 Prozent höher als vor der Industrialisierung. Der Anstieg des atmosphärischen CO₂ ist der Haupttreiber des globalen Klimawandels. Und die Folgen des menschlichen Eingriffs in die Kohlenstoffverteilung wären noch viel dramatischer, würden nicht die Ozeane als Puffer dienen: Sie nahmen rund ein Viertel bis ein Drittel des seit 1750 ausgestoßenen CO₂ auf.

Meeresökosysteme leiden

Diese Pufferleistung geht allerdings auf Kosten der Ökosysteme in den Meeren. Denn nicht nur das Klima gerät durcheinander. Das CO₂ bildet im Wasser Kohlensäure, die Ozeane werden immer saurer. Der pH-Wert des Meerwassers ist mit dem Anstieg von CO₂ in der Luft in den vergangenen Jahrzehnten rapide gesunken. Diese Versauerung führt im Meerwasser zum Abbau von gelöstem Karbonat, einem unverzichtbaren Baustoff für manche freischwebende Kleinstlebewesen (Plankton) und vor allem für aquatische Schalentiere wie Muscheln und Schnecken sowie für Korallen. Plankton bildet die Grundlage der Nahrungskette in vielen Meeresökosystemen. Muscheln haben neben ihrer Rolle in den Nahrungsnetzwerken wichtige Filter- und Reinigungsfunktionen. Und Korallenriffe bilden einzigartige Lebensräume für eine große Vielfalt von Tieren und Pflanzen.

Schmaler Grat mit schlechter Aussicht

Das Konzept der Planetaren Grenzen sieht die Menschheit in einem sicheren Handlungsspielraum, solange die Karbonatkonzentration im Oberflächenwasser der Ozeane im Durchschnitt bei mindestens 80 Prozent der vorindustriellen Konzentration liegt. Derzeit bewegen wir uns auf einem schmalen Grat entlang dieser Grenze. Gleichzeitig mehren sich [wissenschaftliche Befunde](#), dass schon die derzeitigen Bedingungen für bestimmte Meeresorganismen lebensbedrohlich sind. Auch scheinen einige Arten empfindlicher auf den sinkenden pH-Wert zu reagieren, als bisher bekannt war. Und die Aussichten für die Ozeane sind schlecht: Der Trend der Versauerung verstärkt sich, da die Menschheit noch immer mehr statt weniger CO₂ emittiert.

Fachleute diskutieren unterdessen aufgrund des aktuellen Wissensstandes, den Grenzwert für die Versauerung der Meere anzupassen.

Neben der Versauerung ist die Erwärmung der Ozeane durch den Klimawandel ein wichtiger Faktor. Sie verändert die Aufnahmekapazität des Wassers für CO₂, wärmeres Wasser nimmt weniger CO₂ auf. Zudem verändert der Temperaturanstieg wichtige Stoff- und Energie-Transportströme zwischen Oberfläche und tieferen Schichten der Ozeane. Sie werden daher künftig nicht mehr im bisherigen Maß als Kohlenstoffsенke zur Verfügung stehen. Die verschiedenen Mechanismen dahinter greifen auf komplexe Art und Weise ineinander. Deshalb ist es schwierig, präzise Vorhersagen über Art und Ausmaß der Änderungen zu machen.

Was können wir tun?

Der Zustand der Meere ist kritisch. Auch wenn die Forschenden im Update der Planetaren Grenzen von 2023 davon ausgingen, dass die Grenze der Ozeanversauerung gerade noch eingehalten wird, dürfen wir uns nicht in Sicherheit wägen. CO₂-Emissionen so weit wie möglich zu senken ist wichtiger und drängender denn je. Unvermeidbare Emissionen müssen aus der Atmosphäre entfernt und unschädlich gemacht werden. Dabei helfen Maßnahmen zur nachhaltigen Aufforstung sowie als letzte Möglichkeit neue Technologien. Eine Strategie, die bei der Entwicklung verfolgt wird, ist die direkte Abscheidung von CO₂ aus der Luft. Eine andere vielversprechende Methode, um CO₂ aus der Atmosphäre zu binden ist, den pH-Wert der Ozeane zu erhöhen. Dazu werden in Forschungsprojekten verschiedene natürliche Mineralien getestet, die dem Meerwasser zugegeben werden könnten. Gelingt es, die Ozeane auf diesem Weg zu alkalisieren, dämpft das den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre und gleichzeitig die Versauerung der Meere.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Prof. Dr. Ulf Riebesell](#)

Professor für Biologische Ozeanographie
am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für
Ozeanforschung Kiel



Phosphor- und Stickstoffkreisläufe: Zu viel an falscher Stelle

In der Natur fließen essentielle Grundstoffe des Lebens in Kreisläufen. Tier- und Pflanzenarten sowie komplexe Ökosysteme sind darauf ausgelegt, die begrenzt verfügbaren Stoffe optimal zu nutzen. Der Mensch verzerrt die Kreisläufe dramatisch – mit schweren Folgen für den ganzen Planeten und das Leben darauf.

Zu den essentiellen Elementen für alle Lebewesen gehören Stickstoff und Phosphor. Stickstoff ist essentieller Bestandteil des Erbguts und von Aminosäuren, aus denen alle Proteine aufgebaut sind. Phosphorverbindungen dienen im Stoffwechsel von Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren unter anderem als wichtige Energieträger. In der Natur stehen allen Lebewesen begrenzte Mengen dieser essentiellen Stoffe zur Verfügung. Biologische Gleichgewichte sind darauf ausgerichtet, limitierte Nährstoffe optimal auszuschöpfen. Arten, Artengemeinschaften und Ökosysteme haben ihren Bedarf daran angepasst.

Verfügbarer Stickstoff verdoppelt

Die einzigen Lebewesen, die auf natürlichem Weg Stickstoff aus der Luft fixieren können, sind Bakterien. Meistens leben sie an den Wurzeln bestimmter Pflanzen wie Erbse oder Lupine, an die sie den Stickstoff abgeben. Aber auch aquatische Cyanobakterien (Blaualgen) können Stickstoff fixieren. In Form von Futter- und Nahrungsmitteln steht er dann Tier und Mensch zur Verfügung. Andere Mikroorganismen geben bei der Zersetzung organischen Materials elementaren Stickstoff wieder in die Atmosphäre ab.

Der Mensch jedoch führt ganz neue Dimensionen umgesetzter Stickstoffmengen in den Kreislauf ein. Chemiker:innen erfanden Anfang des 20. Jahrhunderts ein Verfahren, gasförmigen Stickstoff aus der Luft in eine Form umzuwandeln, die für Pflanzen verwertbar ist. Der Kunstdünger war erfunden. Für die Menschheit schien ein Segen. Die Bevölkerung wuchs und die Landwirtschaft war gefordert, Nahrungsmittel für alle bereitzustellen. Die Mengen an Stickstoff, die seither als Kunstdünger auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht wurden und werden, liegen deutlich über den Mengen, die auf natürlichem Weg aus der Luft fixiert werden. Wissenschaftler:innen gehen davon aus, dass menschliche Aktivitäten in den letzten hundert Jahren die Menge an verfügbarem Stickstoff im Umlauf in etwa verdoppelt haben.

Kreisläufe verzerrt

Und nicht nur die Menge sprengt die natürlichen Grenzen. Zudem verzerrt der Mensch den Stickstoffkreislauf regional und weltweit.

Die Nachfrage nach Agrarprodukten trägt dazu weiter maßgeblich bei. Zum Beispiel wird Soja, eine der Pflanzen, die Stickstoff von Bakterien aufnimmt, als Futtermittel vom amerikanischen Kontinent nach Europa importiert. Der verfütterte Stickstoff gelangt als Fleisch teilweise auf die europäischen oder als Export auf weltweite Märkte. Rund um die Standorte der Tierhaltung wird ein erheblicher Teil in Form von Gülle aus den Ställen zum Düngen auf die Felder gebracht.

Stickstoff aus Gülle und Kunstdünger, den die Pflanzen nicht aufnehmen, sickert von dort ins Grundwasser oder wird ausgewaschen und belastet Grundwasser, Flüsse und Seen sowie die Küstenzonen der Meere. Auch Stickstoff aus Industrie- und Verkehrsabgasen gelangt zum Teil mit dem Regen in Böden und Gewässer.

Schäden zu Land, zu Wasser und in der Luft

Zu den Folgen der Überdüngung gehört das zeitweise massive Wachstum bestimmter Algen. In Kombination mit einer Erwärmung des Wassers führt es häufig zu Sauerstoffmangel, den im schlimmsten Fall kaum Tiere und Pflanzen überleben. Das Gewässer verodet, es 'kippt um'. Auch an Land überwuchern schnell wachsende Pflanzen solche, die eigentlich an nährstoffärmere Bedingungen angepasst sind. Der Überschuss an leicht verfügbaren Nährstoffen engt das Artenspektrum ein und bringt ganze Ökosysteme aus ihrem Gleichgewicht.

Auch in die Luft geben überdüngte Agrarflächen Stickstoff ab: Gasförmiges Ammoniak kann Ökosysteme durch eine Überversorgung mit Nährstoffen schädigen und trägt zur Versauerung von Böden bei. Bis in die Atmosphäre sind die Folgen des menschlichen Umgangs mit Stickstoff zu spüren, denn Agrarflächen geben die Stickstoffverbindung Lachgas in die Luft ab. Das starke Treibhausgas trägt zur Erderwärmung bei und beeinflusst die Bildung und den Abbau von Ozon (siehe S. 10). Industrielle Verbrennungsprozesse und Treibstoffverbrauch im Verkehr setzen weitere gasförmige Stickstoffverbindungen aus fossilen Energieträgern frei, die in der Atmosphäre ihre schädliche Wirkung entfalten. Stickstoffoxide aus Flugzeugabgasen greifen dort zum Beispiel die schützende Ozonschicht an.



Beschleunigte Freisetzung von Phosphor

Ähnlich wie Stickstoff ist Phosphor ein essentielles Nährelement für Pflanzen. Wasserlösliche Phosphorverbindungen werden als Düngemittel auf vielen landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht. Auch sie verursachen Algenwachstum und Sauerstoffmangel in Gewässern. Der Grundstoff für die Düngemittel sind fossile Lagerstätten. Der Mensch setzt binnen kürzester Zeit Mengen an Phosphorverbindungen in die Umwelt frei, die sich über Millionen von Jahren gebildet haben und unter der Erde lagerten.

Industrialisierung und Intensivierung der Landwirtschaft haben die globalen Einflüsse des Menschen auf die natürlichen Stoffkreisläufe verstärkt. Den Vergleichswert aus dem vorindustriellen Zeitalter für die Menge an fixiertem, in Umlauf gebracht und im Kreislauf umgelenktem Stickstoff und Phosphor, setzen die Autoren der Planetaren Grenzen auf null. Wissenschaftler:innen versuchen zu ermitteln, wie weit der Mensch in die Kreisläufe eingreifen kann, ohne die Stabilität der Ökosysteme und fundamentaler geophysikalischer und geochemischer Prozesse zu gefährden.

Grenzen weit überschritten

Für Phosphor betrachten sie regionale und globale Stoffströme und definieren zwei Grenzen. Die erste legt die Menge an Phosphor fest, die maximal als Dünger auf Böden freigesetzt werden soll. Die Autor:innen nennen dies die regionale Grenze und haben 2015 einen eigenen Grenzwert hierfür festgesetzt. Durch Bodenerosion und Wasserabfluss von Agrarflächen gelangen Teile davon in Seen und Flüsse und schließlich ins Meer. Als Maß für die weltweiten Phosphorströme betrachten sie deshalb als Zweites die Gesamtmenge des Elements, die in die Meere eingetragen wird. Derzeit sind die Grenzen für Phosphorfreisetzung sowohl auf regionaler wie auf globaler Ebene um ein Vielfaches überschritten.

Für Stickstoff begrenzt das Konzept die Menge, die durch industrielle und landwirtschaftliche Prozesse aus der Luft fixiert und verfügbar gemacht werden darf, um in den sicheren Handlungsraum eines stabilen Lebensraumes für den Menschen und andere Arten zurückzukehren. Um sich die Größenordnungen vor Augen zu führen: Etwa 100 bis 120 Millionen Tonnen industriell fixierten Stickstoffs werden pro Jahr als Dünger auf Agrarflächen ausgebracht. Hinzu kommt die vom Menschen gezielt herbeigeführte Stickstofffixierung durch Bodenbakterien in Verbindung mit Kulturpflanzen wie Soja. Die Menge liegt in der Größenordnung von 30 bis 100 Millionen Tonnen pro Jahr. Zusammengenommen führen menschliche Aktivitäten dem Kreislauf jedes Jahr also etwa 130 bis 220 Millionen Tonnen Stick-

stoff in Formen zu, die für Pflanzen verfügbar sind. Die weltweite Grenze haben die Forschenden auf 62 Millionen Tonnen pro Jahr gesetzt. Sie ist also um das Zwei- bis Dreifache überschritten.

Was können wir tun, um in die Grenzen zurückzukehren?

Die Planetaren Grenzen sind weltweite Durchschnittswerte, an denen die Menschheit sich orientieren kann. Für die Auswirkungen der Umverteilung natürlicher Elemente ist jedoch die regionale Verteilung ebenso entscheidend wie ihre Gesamtmenge im Umlauf.

Unter dem Aspekt sind heutige Praktiken der Lebensmittelindustrien – global verschifftete Futtermitteltransporte und lokal konzentrierte Tierhaltung sowie teilweise übermäßige Düngung mit Stickstoff und Phosphor – kritisch zu sehen. Wissenschaftler:innen sprechen sich für Formen der Landwirtschaft aus, bei denen weniger Tiere pro Fläche gehalten und Düngemittel effizienter eingesetzt werden. Dabei stellt sich die drängende Frage, wie wir gleichzeitig die Nahrungsmittelsicherheit für weite Teile der globalen Bevölkerung gewährleisten können.

Denn weltweit reduzierter Düngemiteinsatz führt zu Verknappungen des globalen Angebots. Die in der Folge steigenden Preise würden eine Verschlechterung der Ernährungssituation in armen Ländern bedeuten.

Detailliertere Kenntnisse der regionalen und globalen Stoffkreisläufe, neuartige Techniken und angepasste Praktiken in der Landwirtschaft können stellenweise helfen, Stickstofffreisetzung aus dem Anbau zu reduzieren. Dabei müssen jedoch Verlagerungseffekte konsequent mitgedacht werden: Die weltweite Freisetzung von Stickstoff und Phosphor wird nicht weniger, wenn in deutschen Ställen weniger Gülle produziert, dafür aber Fleisch aus anderen Ländern importiert wird. Deshalb erfordert eine nachhaltige Umstellung der Agrarproduktion ein verändertes Bewusstsein der Verbraucher:innen und der Politik. Nachfrage und Verbrauch landwirtschaftlicher Produkte müssen sich an den Grenzen des Planeten orientieren und entsprechend reguliert werden. Neben der Landwirtschaft sind Verbrennungsabgase aus Verkehr und Industrie ein wichtiger Aspekt: Sie müssen reduziert werden. Die Verkehrswende ist ein wichtiger Pfad zu diesem Ziel.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Prof. Dr. Doris Vetterlein](#)
Bodensystemforschung
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ



[Prof. Dr. Hans-Jörg Vogel](#)
Leiter des Departments Bodensystemforschung am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ



[PD Dr. Reinhard Well](#)
Thünen Institut für Agrarklimaschutz

Planetare Grenze Süßwassernutzung: Der Kreislauf zählt

Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere – alle Lebewesen der Erde sind auf Wasser angewiesen. Entscheidend ist, dass es zur rechten Zeit am rechten Ort in der richtigen Menge und Qualität zur Verfügung steht. Dafür sorgt im natürlichen Gleichgewicht der weltweite Wasserkreislauf. Doch der Mensch greift massiv in den Kreislauf ein – mit dramatischen Folgen für Lebewesen und Umwelt.

Wasser ist ein lebenswichtiges Element. Es transportiert Materie wie Mineralien, Nährstoffe oder Sauerstoff. Und es überträgt Energie zwischen verschiedenen Teilen des Erdsystems, etwa in Form von Wärme oder mechanischen Kräften. Ohne Wasser gibt es keine Photosynthese – den Prozess, bei dem Pflanzen Energie von der Sonne auf Kohlenstoffe übertragen. Ohne Wasser ist keine Atmung möglich – bei der die Energie nutzbar wird. Kurz: Ohne Wasser existiert kein Leben, wie wir es kennen.

Veränderter Wasserkreislauf

Der natürliche Kreislauf des Wassers, also die Verdunstung an der Erdoberfläche, Kondensation in der Atmosphäre, Niederschläge und Versickerung, ist Grundlage und Treiber vieler lebenswichtiger Prozesse – von der biomolekularen bis zur geophysikalischen Ebene. Doch der Mensch greift in diesen Kreislauf ein. Wissenschaftler:innen beobachten dramatische Veränderungen von Wasserläufen und Reservoirs im Vergleich zu deren vorindustriellem Erscheinungsbild. Sie untersuchen Oberflächengewässer und Grundwasser, die sie zusammen als 'blaues Wasser' bezeichnen. Und sie messen bodengebundene Feuchtigkeit, Verdunstung und Niederschläge, die zusammengenommen als 'grünes Wasser' bezeichnet werden. Der globale Wasserkreislauf umfasst beide Bereiche. Und Eingriffe des Menschen beeinträchtigen die Funktion sowohl blauer Wasserläufe als auch der grünen Wasserreservoirs in Boden und Luft.

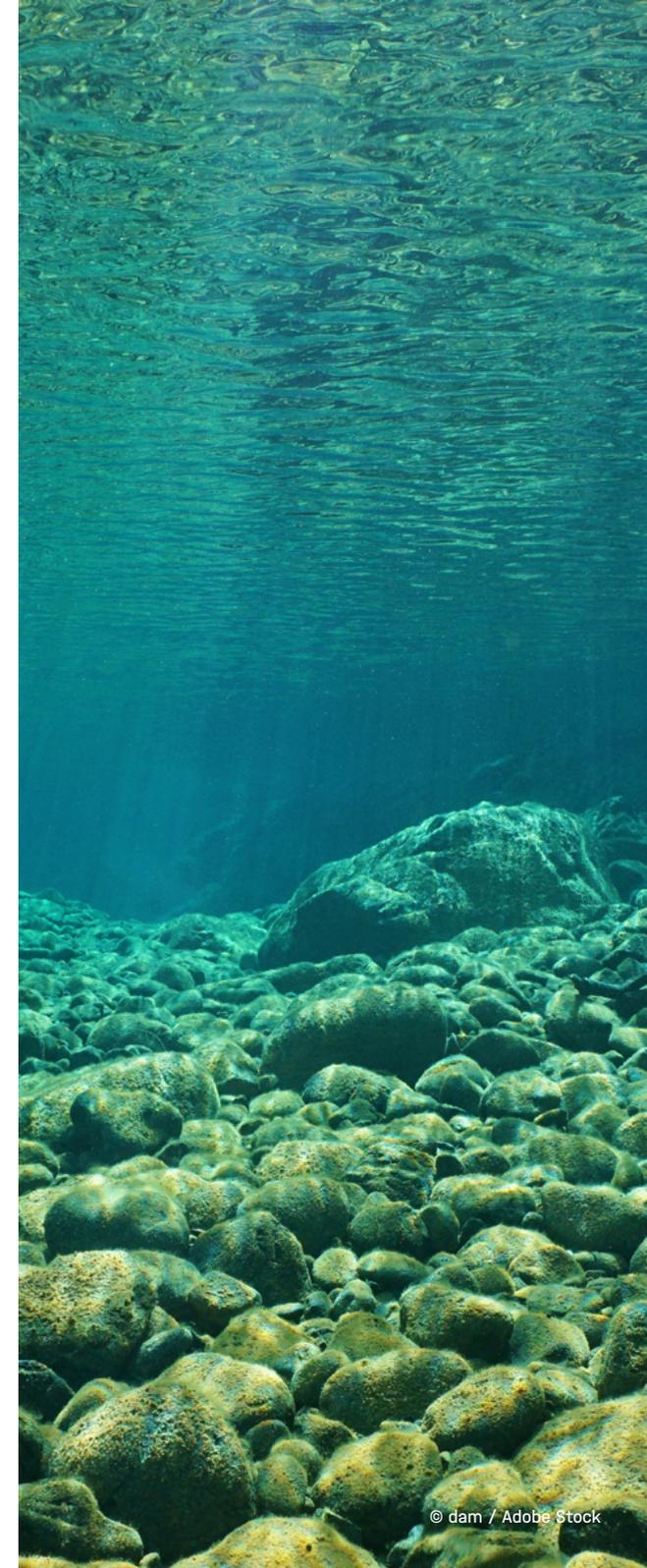
Umverteilung durch den Menschen

Wasserentnahmen für Industrie oder Landwirtschaft reduzieren die Abflussmengen entlang bestimmter Gewässerabschnitte und können zu Tiefständen in Flüssen und Seen bis hin zum Austrocknen führen. Oft wird das entnommene Wasser genutzt, um Felder zu bewässern. Das erhöht die Bodenfeuchte in den bewässerten Gebieten über das natürliche Maß, während in flussabwärts gelegenen Landstrichen das Wasser fehlt. Diese Art von Umverteilung ist häufig zu beobachten auf und um besonders stark bewässerte Agrarflächen in Zentral- und Südasien, Ostchina, den westlichen Vereinigten Staaten und im Nildelta.

Um sie als Transportwege zu nutzen und um Überschwemmungen vorzubeugen, begradigen Menschen Flussläufe. Auen, die natürlichen Überschwemmungsgebiete entlang eines Flusslaufes, werden trockengelegt und verändern ihr Erscheinungsbild. Oft werden sie landwirtschaftlich genutzt. An vielen Stellen haben Menschen zudem Dämme errichtet, um Trink- und Nutzwasser zu speichern oder Energie aus der Strömung des Wassers zu gewinnen. Die Bauten beeinflussen die Dynamik des Flusses und seiner Umgebung und greifen damit tief in die dortigen Ökosysteme ein. Besonders stark vom Menschen geprägt wurde etwa der Lauf des Nils und das Nildelta, die Mündungsregion am Mittelmeer. In der Folge ist das Flusspferd ('Nilpferd'), dessen Lebensraum die weitläufigen flachen Uferzonen darstellten, heute am gesamten Unterlauf ausgestorben. Innerhalb Europas gilt die albanische Vjosa als letzter naturbelassener Flusslauf. Auch Moore hat der Mensch großflächig trockengelegt, um die Flächen für Anbau und Viehzucht zu nutzen. In der Regel verursachen menschengemachte Veränderungen des Wasserhaushalts einen Rückgang der Artenvielfalt in den betroffenen Landschaften.

Klimawandel und Wasserhaushalt

Auch die sich ändernden Klimaverhältnisse beeinflussen den natürlichen Kreislauf des Wassers. Hitze und anhaltender Niederschlagsmangel führen immer häufiger zu Dürren – der Boden trocknet aus, Lebewesen im Boden und auf den Landoberflächen leiden. An anderer Stelle nehmen Niederschläge an Intensität zu. Es kommt zu Starkregen in Mengen, die kaum oder nicht versickern können und in der Folge zu Hochwasser, das ganze Landschaften überflutet. Flüsse und Seen verändern sich: Sie führen zeitweise besonders große oder besonders geringe Wassermengen, fließen schneller oder langsamer. Dabei führen sie unterschiedlich viel Sediment, gelöste Substanzen und Energie mit sich. Die Folgen zeigen sich auf allen Ebenen. Lokal und regional kommt es zu Trockenheit oder Überschwemmungen und langfristig verändern sich Ökosysteme – oft nimmt die Artenvielfalt ab. Regional und global werden die Folgen des veränderten Wasserkreislaufs wiederum als Wetter- oder Klimaereignisse spürbar für Mensch und Natur.



Planetare Grenze: Änderung der Wasserflüsse

Um das menschliche Eingreifen in den Wasserkreislauf zu beziffern, messen Forschende jedes Jahr den Anteil der Erdoberfläche, auf dem sich deutliche Veränderungen der Süßwasserflüsse zeigen. Einen Vergleichswert legten sie fest, indem sie mithilfe von Computermodellen die natürlichen weltweiten Süßwasserläufe im 17. bis 19. Jahrhundert nachstellten. Während dieser Zeit wichen die Läufe regelmäßig auf etwa einem Zehntel der Fläche von ihren Grundmustern ab. Das heißt, auf einem Zehntel der modellierten Flächen kam es zu Überschwemmungen, Hoch- oder Tiefständen der Gewässer oder zu außergewöhnlicher Wasserarmut und Trockenheit. Den Wert von rund zehn Prozent der weltweiten Fläche, auf der lokale Veränderungen im Süßwasserfluss auftreten, haben Wissenschaftler:innen als Planetare Grenze der Änderungen im Süßwassersystem festgelegt. Diese Grenze war neueren Erkenntnissen zufolge bereits Anfang des 20. Jahrhunderts überschritten.

Trockenheit und extreme Abweichungen immer häufiger

Für das industrielle Zeitalter von 1860 bis ins Jahr 2005 ermittelten die Forschenden stetig wachsende Flächenanteile, auf denen Süßwasserflüsse von ihren Grundmustern abweichen. Für 2005, das letzte Jahr des untersuchten Zeitraums, liegt der Wert bei rund 18 Prozent für blaues Wasser und rund 16 Prozent für grünes Wasser (Bodenfeuchte). Die Werte umfassen Abweichungen in beide Richtungen: mehr Wasser und weniger Wasser als im Normalzustand. Trockenheit tritt dabei häufiger auf als Hochwasser und Überschwemmungen. Und die Flächen auf denen zeitweise relativer Wassermangel herrschte, nahmen bis zum Ende des untersuchten Zeitraumes immer weiter zu. Außerdem stieg die Häufigkeit von extremen Abweichungen stärker als die geringerer Veränderungen.

Die Wissenschaftler:innen gehen davon aus, dass die häufigeren Abweichungen direkt oder indirekt auf menschliche Eingriffe zurückzuführen sind. Umverteilungen durch Entnahmen, Bewässerung und Änderungen der Landnutzung beeinflussen den Wasserkreislauf direkt. Darüber hinaus wirken menschliche Aktivitäten indirekt auf den Wasserhaushalt des Planeten, indem sie das Klima verändern.

Was tun? Bewusstsein für Kreisläufe stärken

Der häufigste Grund für Süßwasserentnahmen ist die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen. Als besonders durstig verrufen ist die Baumwollpflanze, die großflächig in Gebieten angebaut wird, in



Satellitenbild eines Flussverlaufs © Foto von NASA auf Unsplash

denen sie natürlicherweise gar nicht gedeihen könnte. Aber auch der Getreideanbau verschlingt große Wassermengen. Doch was zählt, ist nicht nur die Wassermenge, die an einer Stelle entnommen wird. Wichtig ist, bei der Nutzung den Kreislauf zu beachten: Entscheidend ist also auch, an welcher Stelle, in welcher Menge und in welcher Qualität genutztes Wasser zurück in die Umwelt gelangt. Abwärme oder ungereinigtes Abwasser in Flüsse einzuleiten, führt dort zu Sauerstoffmangel. Wasser, das von Agrarflächen mit Düngemitteln angereichert in Flüsse, Seen und das Meer fließt, verursacht dort Überdüngung (siehe S. 12). Und Wasserdampf hat in der Atmosphäre ganz andere Funktionen und Wirkungen, als das zuvor zur Kühlung aus einem See oder Fluss entnommene Wasser.

Politik muss Rahmenbedingungen schaffen, die auf allen Ebenen das Bewusstsein für den Wert des Wassers und seiner Kreisläufe schärft. In der landwirtschaftlichen Produktion, verarbeitenden Industrien und auch bei den Konsumierenden, deren Nachfrage nach Trinkwasser, Nahrungsmitteln und Konsumgütern den Markt mitbestimmt.



Prof. Dr. Dietrich Borchardt
Leiter des Department für
Aquatische Ökosystemanalyse am
Helmholtz-Zentrum für Umwelt-
forschung (UFZ)

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:

Landnutzung: Soviel Wald braucht das Leben auf der Erde

Landflächen liefern Nahrung, Energie, Werk- und Baustoffe für Menschen, unzählige Arten von Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen. Wie stark darf der Mensch sie beanspruchen, ohne die Stabilität des Erdsystems zu gefährden?

Die Oberfläche unseres Planeten hat vielfältige Erscheinungsbilder. Sie ist bedeckt von Wäldern, Graslandschaften wie Steppen und Savannen, von Feuchtgebieten oder Wüsten. Jede Art von Landschaft leistet ihren einzigartigen Beitrag zur Funktion und Stabilität des Erdsystems. Böden und die Pflanzen und Tiere, die darin und darauf gedeihen, versorgen die Menschheit mit Nahrung, Energie, Textilfasern und Baumaterialien. Sie schützen vor Naturgewalten und regulieren die Kreisläufe von Wasser und anderen Nährstoffen. Und natürliche Landflächen sind wichtige kulturelle und spirituelle Räume des gesellschaftlichen Lebens.

Doch der Mensch verändert die Komponenten des Erdsystems massiv. Wo Industrien Bodenschätze wie Erdöl, Kohle oder seltene Erden bergen, hinterlassen sie oft völlig verödete Landstriche. Siedlungen, insbesondere große Städte, Industrie und Verkehr tragen zur Bodenversiegelung bei, so dass kein Austausch von Wasser und Nährstoffen mehr stattfinden kann. Und der Hunger nach Baustoffen, Energieträgern und Nahrungsmitteln fördert die Umwandlung von Waldgebieten in Minen, Tagebau sowie Ackerland oder Weideflächen. Diese Überbeanspruchung beeinträchtigt die Funktionsfähigkeit der Landsysteme so stark, dass moderne Gesellschaften ihren derzeitigen Lebensstil auf Dauer nicht aufrechterhalten können.

Waldbedeckung als Grenzwert

Johan Rockström und seine Mitforschenden setzten in ihrem ersten Entwurf der ['Planetaren Grenzen'](#) den maximalen Wert für die landwirtschaftliche Nutzung auf 15 Prozent aller eisfreien Landflächen fest. Diese Grenze ist längst weit überschritten. Laut der UN Food and Agriculture Organization (FAO) machen Agrarflächen über 40 % der weltweiten bewohnbaren Landflächen aus. Die Autor:innen eines [Updates des Planetare Grenzen-Konzepts von 2015](#) verständigten sich deshalb darauf, die Belastung des Planeten durch Eingriffe in die Erdoberfläche anhand eines anderen Indikators darzustellen: Die Waldbedeckung. Veränderungen an den großen Waldgebieten haben nämlich das besondere Potential, Auswirkung weit über die Region hinaus zu entfalten, in der sie stattfinden. Wälder spielen eine zentrale Rolle bei der Kopplung von Erdoberfläche und Klima. Die planetare Grenze der 'Veränderung der Landsysteme' nimmt anhand der Wälder jene Prozesse besonders ins Visier, die das Klima direkt regulieren: Die Flüsse von Wasser, Kohlenstoff und Energie zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre.

Auch zwei weitere der neun Planetaren Grenzen, die der 'Intaktheit der Biosphäre' ([siehe S. 19](#)) und die 'Biogeochemischen Flüsse' ([siehe S. 13](#)), zeigen sehr deutlich: Der Mensch kann Landschaften und ihre Lebewesen nur begrenzt beeinflussen, ohne die globalen Gleichgewichte massiv zu stören.

Rund 30 Prozent der Landflächen der Erde sind mit Wald bedeckt

Die globale Waldfläche verteilt sich auf die borealen (nordischen) Nadelwälder, die sich über die gesamte Nordhalbkugel durch Japan, die Mongolei, Russland, Alaska, Kanada und Skandinavien erstrecken, die tropischen Regenwälder Südamerikas, Zentralafrika und Südasiens, und die Laub- und Mischwälder der gemäßigten Klimazonen. Wälder erbringen unersetzliche Ökosystemleistungen:

- Sie binden und speichern Kohlenstoff, bieten Lebensraum für Pflanzen und Tiere
- Sie bilden Humus und schützen den Boden vor Erosion, filtern Wasser und vermitteln den Austausch von Wasser zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre
- Sie liefern Nahrung, Roh- und Baustoffe für Menschen
- Sie schützen vor Hochwasser und Lawinen
- Sie bieten wichtige Erholungs- und Gesundheitsfunktionen für Menschen und sind von hohem kulturellem Wert

Waldfunktionen als wichtige Klimafaktoren

Wälder stehen ständig im engen Austausch mit der Atmosphäre. Bäume und Sträucher nehmen Wasser aus dem Boden auf. Über ihr Blattwerk verdunstet es in die Luftschichten über dem Wald. Dieser Vorgang ist nicht nur ein essentieller Teil des gesamten globalen Wasserkreislaufes. Mit dem verdunstenden Wasser gibt der Wald auch Energie in die Atmosphäre ab. Als latente Wärme in den Wassermolekülen gespeichert, wird sie bei der Wolkenbildung in höheren Luftschichten wieder freigesetzt. Zusätzlich reflektieren Wolken einen Teil des Sonnenlichts und beeinflussen so die Aufnahme



von Energie. Gleichzeitig absorbiert die dunkle Oberfläche der Baumkronen Energie aus der Sonnenstrahlung, um Kohlenstoffdioxid aus der Luft zu binden. Mithilfe von Sonnenstrahlen setzen Pflanzen die kleinen CO₂-Moleküle zu komplexen, energiehaltigen Kohlenstoffverbindungen zusammen, die der Mensch auf vielfältige Weise nutzt. Einen Teil davon setzen Pflanzen in Biomasse um und binden den Kohlenstoff damit langfristig. Etwa ein Drittel des von Menschen emittierten fossilen Kohlendioxids ist aktuell in den Wälder gebunden. Zudem nehmen Wälder Bewegungsenergie aus der Atmosphäre auf und beeinflussen dadurch Luftströmungen wie Winde und Turbulenzen. Diese durch die Wälder regulierten Energie-, Kohlenstoff- und Wasserflüsse sind wichtige Faktoren in der Ausprägung regionalen Klimas.

Landwirtschaftliche Nutzung treibt Entwaldung an

Heute ist die Grenze der Entwaldung deutlich überschritten. Nur noch 60 Prozent der ursprünglichen Waldfläche sind im weltweiten Durchschnitt von Wald bedeckt. Die Planetare Grenze wurde auf 75 Prozent der ursprünglichen Waldfläche festgelegt. Auf dem afrikanischen und dem asiatischen Kontinent ist der Bestand tropischer Regenwälder noch stärker reduziert als auf dem amerikanischen. Europa unterschreitet die regionale Grenze von 50 Prozent für gemäßigte Wälder mit derzeit 34 Prozent dramatisch.

Landwirtschaftlich genutzte Fläche steht zwar nicht mehr als Maß für die Planetare Grenze der Landsystemveränderungen. Landwirtschaft bleibt aber weltweit der Haupttreiber der Entwaldung. Der Indikator 'Waldfläche' spiegelt die Landnutzung zur Nahrungsgewinnung also indirekt wider. Der größte Teil aller entwaldeten Flächen wird in Weide- oder Anbauland umgewandelt. Dadurch gehen nicht nur wertvolle Regulationsfunktionen des Waldes verloren. Die Bewirtschaftung durch den Menschen verändert auch weitere Stoffkreisläufe (siehe S. 13), beispielsweise die von Stickstoff und Phosphat. Die Folge: Überdüngte Flüsse und Seen und schließlich sauerstoffarme 'Todeszonen' in küstennahen Meeresökosystemen. Monokulturen bestimmter Pflanzen und der Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln im großen Maßstab dezimieren die Artenvielfalt (siehe S. 17). Die eingesetzten Chemikalien (siehe S. 6) belasten Lebensräume im Boden, in Flüssen und Seen (siehe S. 15) und in der Luft. Heutige intensive landwirtschaftliche Praktiken – vor allem im Zusammenhang mit Fleisch- und Milchproduktion – stehen also in mehrfacher Hinsicht im Konflikt mit den Planetaren Grenzen.

Dabei betonen die Forschenden auch im zweiten Update des Planetaren Grenzen-Konzepts von 2023, dass es theoretisch innerhalb der Planetaren Grenzen möglich ist, 10 Milliarden Menschen auf der Erde zu ernähren. Dafür aber bedarf es tiefgreifender Transformationen –

der strikten Dekarbonisierung aller Industrien und einer Ausrichtung auf Nachhaltigkeit in allen Bereichen der Ernährungsindustrie und Landwirtschaft.

Wald aufforsten?

Kann man Wald nicht einfach nachpflanzen? Im Zusammenhang mit CO₂-Ausgleichszertifikaten für Privatpersonen und Unternehmen wurden Aufforstungsprojekte populär. Sie sind in der Wissenschaft aus verschiedenen Gründen umstritten. Abgesehen vom intransparenten Vorgehen international agierender Unternehmen in diesen Projekten, wurden dabei zum Beispiel natürliche Savannen fälschlicherweise zu Wäldern umgebaut. Dabei wurden teilweise Baumarten gepflanzt, die nicht in das vorhandene Ökosystem passen, den Wasserkreislauf verändern und die heimischen Arten verdrängen oder sogar lokal aussterben lassen. Gleichzeitig reduziert der fortschreitende Klimawandel in Europa die Auswahl an Baumarten, die unter den zukünftigen Bedingungen noch gedeihen können.

Ganz so einfach ist es also nicht, Waldflächen wiederherzustellen. Strategien für nachhaltige Landnutzung müssen vielmehr die Zusammenhänge innerhalb des Erdsystems und zwischen dem Planeten und der Menschheit im Blick haben. Sie müssen Ausgleich zwischen den verschiedenen Interessen schaffen, die teilweise im Konflikt miteinander stehen.

Was können wir sonst tun?

Forschende des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) beschreiben in einem [Special Report von 2024](#), wie das Management der Landnutzung transformiert werden kann, um in den sicheren Handlungsspielraum der Planetaren Grenzen zurückzukehren. Der Report stellt die sozioökonomischen Dimensionen der Transformationen ebenso dar wie die ökologischen. Es wird diskutiert, wie die Funktionen von Ökosystemen wiederhergestellt werden können und wie ein Gleichgewicht von Produktivität und Nachhaltigkeit gefunden werden kann. Ein jüngst unter der Leitung des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) veröffentlichter Report stellt Lösungen vor, wie die Entwaldung bekämpft und andere Herausforderungen zum Erhalt der Biosphäre angegangen werden können.

Die 'Vision für Landwirtschaft und Ernährung' der EU Kommission zielt in bestimmten Punkten ebenfalls auf eine nachhaltigere Gestaltung des Agrarsektors ab, darunter die verstärkte Digitalisierung der Landwirtschaft. Kritische Stimmen bemängeln allerdings, dass die 'Vision' die Bewusstseinsbildung der Konsumierenden und die Gestaltung der Nachfrage zu wenig berücksichtigt. Denn ob der eigene

Lebensstil eine nachhaltige Nutzung weltweiter Landflächen unterstützt, kann jede und jeder Einzelne selbst überprüfen. Dafür müssen die nötigen Informationen transparent zur Verfügung gestellt werden. Anhaltspunkte finden sich zum Beispiel im Konzept der 'Planetary Health Diet', einer Ernährungsweise, die die Gesundheit des Menschen und der Erde gleichermaßen schützen soll.

Auch eine kreislauforientierte Bioökonomie kann helfen, Landsysteme zu schützen. Dabei steht derzeit allerdings der steigende Einsatz sogenannter Bioenergie in Konflikt mit anderen Zielen wie Nahrungs- und Futtermittelproduktion, Schutz der Artenvielfalt oder Schonung der Böden.

Forschende des PIK haben gemeinsam mit dem Center for Global Commons (CGC), der weltweiten Initiative Sustainable Solutions Network und dem Unternehmen SYSTEMIQ das Global Commons Stewardship Framework entwickelt. Es bietet einen wissenschaftlich fundierten Handlungsrahmen, um die Gemeingüter der Menschheit zu schützen und eine nachhaltige Zukunft zu gestalten.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Dr. Friedrich J. Bohn](#)
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)

Intakte Biosphäre: Lebensraum für Mensch, Tier, Pflanzen

Stabilität und Widerstandsfähigkeit des gesamten Erdsystems hängen davon ab, wie intakt und funktionsfähig die Lebensräume sind – zu Land, in Flüssen und Seen, an Küsten und in Ozeanen. Deshalb ist die Integrität der Biosphäre eine der neun planetaren Grenzen. Forschende messen sie anhand von zwei Größen: der Biodiversität und der Ausbeutung durch den Menschen.

Die Biosphäre umfasst alle Schichten der Erde, die mit Lebewesen besiedelt sind. Ihre unzähligen Interaktionen mit anderen Sphären prägen viele essentielle Prozesse. Übermäßige, durch den Menschen hervorgerufene Veränderungen dieser Lebensräume gelten als eine der drei zentralen Belastungsgrenzen für das Erdsystem – zusammen mit dem Klimawandel (siehe S. 4) und der Freisetzung neuer Substanzen wie Chemikalien und Plastik (siehe S. 6).

Lebenswichtige weltweite Stoffkreisläufe funktionieren nur in einer intakten Biosphäre. Sie bildet beispielsweise den Kern des Kohlenstoffkreislaufes: Pflanzen nehmen Kohlendioxid (CO₂), das durch Energie- und Materialverbrauch freigesetzt wird, aus der Atmosphäre auf. Sie nutzen Sonnenenergie um daraus Biomasse zu produzieren. Dadurch sichern sie nicht nur die Nahrungsversorgung aller Lebewesen, sie stabilisieren auch das Klima. Viele verschiedene Lebewesen verarbeiten und verteilen weitere essentielle Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor. Wie stark die Biosphäre belastet ist, schätzen Wissenschaftler:innen anhand der herrschenden Biodiversität und der funktionalen Integrität ein. Hier erklären wir die beiden Größen.

Biodiversität

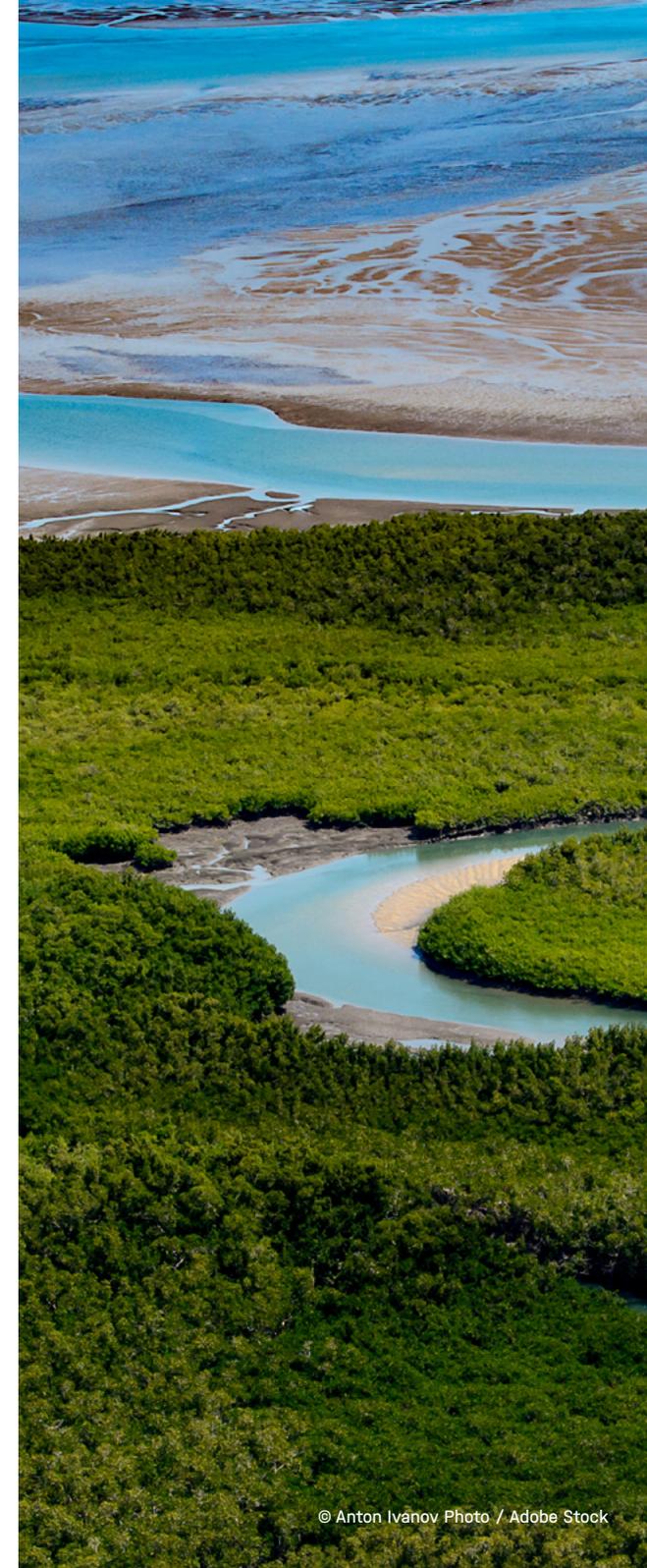
Der Begriff Biodiversität umfasst die genetische Vielfalt innerhalb einer Art, die Vielfalt verschiedener Arten sowie die Vielfalt unterschiedlicher Ökosysteme. Genetische Vielfalt beschreibt die Unterschiede im Erbgut verschiedener Individuen einer Art, etwa verschiedener Pflanzensorten oder Nutztierassen. Sie sorgt dafür, dass einzelne Arten sich an veränderte Umweltbedingungen anpassen können. Artenvielfalt ist die Bandbreite verschiedener Spezies in einem Ökosystem. Sie ist unter anderem wichtig, damit ökologische Gleichgewichte bei Veränderungen der Umweltbedingungen stabil bleiben oder sich neu einstellen können. Das funktioniert, weil verschiedene Arten unterschiedlich sensibel auf Einflüsse reagieren und weil sie unterschiedliche Aufgaben im Ökosystem erfüllen, die sie teilweise voneinander übernehmen können. Eine Vielfalt an Ökosystemen schließlich bietet verschiedene Lebensräume und Ökosystemleistungen, wie Wasser- oder Luftreinigung, Klimaregulierung. Alle Aspekte sind wichtig für die Biodiversität, die natürliche

Gemeinschaften resilient gegen Umweltveränderungen macht. Weil sie im Vergleich zu anderen möglichen Parametern vergleichsweise gut messbar ist, beobachten Forschende als Anhaltspunkt für die Biodiversität die Aussterberate von Arten weltweit. Allerdings zeigt diese Rate nur die Spitze des Eisberges, denn das Verschwinden einer ganzen Art ist die drastischste, sichtbarste Folge menschlichen Einflusses auf die Artenvielfalt.

Johann Rockström und seine Mitforschenden, die das Konzept der planetaren Grenzen entwickelten, schlugen einen Grenzwert für eine intakte Biosphäre bei maximal 10 von einer Million Arten vor, die pro Jahr aussterben dürften. Anhand historischer Daten schätzen Forschende, dass 0,2 bis 2 pro einer Million Arten im Jahr natürlicherweise aussterben.

Heute sind etwa 2 Millionen Arten auf der Welt beschrieben, Fachleute schätzen, dass in der Größenordnung von 8 bis 100 Millionen Arten existieren: Von höheren Pflanzen, Säugetieren, Vögeln, Reptilien und Fischen bis zu den Insekten und anderen Wirbellosen, von denen viele noch weitgehend unbekannt sind. Die großen Unbekannten machen es knifflig, Aussterberaten genau zu bestimmen. „Die Planetare Grenze von höchstens 10 pro einer Million Arten pro Jahr dürfte aber auf alle Fälle bereits deutlich überschritten sein“, ordnet Josef Settele die bekannten Zahlen ein. Er ist Biologe am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ).

Settele erklärt: „Für Amphibien ist beispielsweise belegt, dass seit etwa dem Jahr 1800 bereits 2,5 Prozent der Amphibienarten weltweit ausgestorben sind.“ Doch die Messung der Aussterberate hat einen weiteren Nachteil: Sie erfolgt mit einem Zeitverzug von Jahren bis Jahrzehnten. So lange dauert es oft, bis eine Art als ausgestorben registriert wird, wenn keine Vertreter mehr nachgewiesen werden. „Wir können also davon ausgehen, dass mittlerweile 10 Prozent aller Amphibien ausgestorben sein dürften“, sagt Settele. Das entspricht einer Rate, die etwa 50 mal höher liegt als die Planetare Grenze, und über 250 mal höher als die geschätzte natürliche Rate des Artensterbens. Forschende gehen davon aus, dass die Aussterberate über alle Arten betrachtet heute mehrere hundertmal höher liegt als im Durchschnitt der vergangenen 10 Millionen Jahre – und dass sie weiter steigt.



Funktionale Integrität der Biosphäre

Als weiterer, funktionaler Maßstab für die Integrität der Biosphäre gilt ihre Produktivität – die Menge an Energie und Material, die die Biosphäre mittels Photosynthese aufnehmen und zur Verfügung stellen kann. Die Antriebsenergie für Prozesse in der Biosphäre stammt von der Sonne. Pflanzen (und manche Bakterienarten) nehmen Sonnenenergie auf. Im Prozess der Photosynthese speichern sie diese in Kohlenstoffverbindungen. Auf diese Art liefert die Biosphäre Material und Energie, die auch menschliches Leben auf der Erde ermöglichen. Seit Urzeiten nutzen Menschen Produkte der Biosphäre: als Nahrung und Viehfutter, als Baustoffe sowie zur Gewinnung von Leder und textilen Fasern. Und sie machen sich die Energie zunutze, die in den Kohlenstoffverbindungen gespeichert ist, um Wärme und Bewegung zu produzieren – ob für Wohnraum oder in industriellen Prozessen. Entnimmt der Mensch zu viel, ob zur Nahrungsherstellung, als Baumaterial oder zur Energiegewinnung, verliert die Biosphäre an Funktion und Stabilität.

Als zweite Komponente der Grenze der Biosphärenintegrität definieren Forschende in einem [Update des Konzepts der planetaren Grenzen von 2023](#) deshalb die Ausbeutung durch den Menschen: Welchen Anteil der natürlichen Produktion eignet er sich für seine Zwecke an? Ein Mindestanteil der global verfügbaren Energie und des Materials muss den Ökosystemen zur Verfügung stehen. Der Anteil, der in die menschliche Nutzung fließt, sollte die Energie- und Materialströme in der Biosphäre und zwischen den verschiedenen Sphären des Planeten nicht wesentlich beeinträchtigen, argumentieren die Forschenden. Wie intakt die Biosphäre ist, hängt also neben der biologischen Vielfalt davon ab, in welchem Ausmaß der Mensch ihre Produkte für seine Zwecke beansprucht.

Funktion der Biosphäre stark beeinträchtigt

Die natürliche Nettoproduktion an energiehaltigen Kohlenstoffverbindungen war im Holozän mehr als 10.000 Jahre lang stabil. Zu Land lag sie beständig bei etwa 56 Gigatonnen (Gt) Kohlenstoff pro Jahr. Aufgrund des steigenden CO₂-Gehalts der Luft, den Pflanzen für die Photosynthese nutzen können, könnte sie heute deutlich höher ausfallen. Menschliche Landnutzung schränkt die Produktion jedoch gleichzeitig ein.

Forschende beurteilen die Funktionsfähigkeit der Biosphäre derzeit als stark beeinträchtigt. Die Autoren des [Updates von 2023](#) schlagen einen Grenzwert für menschliche Nutzung bei 10 Prozent der natürlichen terrestrischen Nettoproduktion vor. Dabei betrachten sie die Nettoproduktion auf dem stabilen Niveau im Holozän, nicht die

theoretisch mögliche Produktion bei dem heutigen höheren CO₂-Gehalt der Atmosphäre. Dass sie als Grundlage für den Grenzwert die Biosphären-Produktivität aus dem Holozän einsetzen, begründen sie damit, dass die derzeit höhere Produktivität nicht für menschliche Zwecke ausgebeutet werden darf. Sie muss geschützt werden, um dem CO₂-Anstieg in der Atmosphäre entgegenwirken zu können.

Menschheit in der Zone hohen Risikos

Stattdessen wurde die 10-Prozent-Grenze der Beanspruchung durch den Menschen bereits im späten 19. Jahrhundert überschritten. Im Jahr 2020 lag der Anteil der menschlichen Nutzung mit 16,8 Gt bei 30 Prozent der Nettoproduktion auf Holozän-Niveau. Damit ist auch die Grenze zur Zone hohen Risikos für planetare Stabilität und Widerstandskraft weit überschritten. Diese legten die Forschenden auf 20 Prozent menschlicher Nutzung fest.

Auch im Meer gibt es Übernutzung der Biosphäre. Hier entnimmt der Mensch im Gegensatz zum Land allerdings in erster Linie Tiere, nicht Pflanzen. Tiere haben die in den Pflanzen fixierte Energie bereits umgesetzt – in Biomasse, Wärme oder Bewegung. Die menschliche Ausbeutung der natürlichen Produktion wirkt sich im Meer daher eher auf die Verläufe von Energieströmen in Ökosystemen aus, weniger auf die insgesamt verfügbare Energiemenge.

Die Belastungsgrenze der Biosphäre ist nach dem jetzigen Stand des Wissens, gemessen sowohl an der Biodiversität als auch an der Ausbeutung durch den Menschen, längst und weit überschritten. Der Zustand der Biosphäre liegt im Bereich hohen Risikos unumkehrbarer Zerstörung mit der Folge deutlicher Destabilisierung verschiedener Komponenten des Erdsystems.

Was hilft?

Rein rechnerisch sei es durchaus möglich, 10 Milliarden Menschen innerhalb der sicheren Grenzen einer intakten Biosphäre auf dem Planeten zu ernähren, stellen die Forschenden in ihrer Veröffentlichung fest. Dafür brauche es aber tiefgreifende Transformationen aller Branchen der weltweiten Ernährungsindustrien, die natürliche Produkte effizienter nutzen müssen. Zudem muss die Nachfrage reguliert werden. Der Schutz von Arten, Biotopen und des Klimas, weniger Verschmutzung, klügere Raumplanung und nachhaltigere Methoden in Land- und Forstwirtschaft und Fischerei sind nur einige Aspekte dieser nötigen Transformation.

Fachliche Prüfung und Beratung zu diesem Beitrag:



[Prof. Dr. Josef Settele](#)

Leiter des Department Naturschutzforschung am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)

Diese Publikation online lesen:

["Planetare Grenzen: Wieviel Eingriffe verkräftet der Lebensraum Erde?" \(2025\)](#)

Helmholtz KLIMA

Markgrafenstr. 22

D-10117 Berlin

Tel: 030 206 7957 44

E-Mail: dialog@helmholtz-klima.de

www.helmholtz-klima.de