



Das sechste Element – wie Forschung nach Kohlenstoff fahndet

Es war ein spektakuläres Experiment: Im September 1991 ließen sich vier Frauen und vier Männer in der Wüste Arizonas in einem gigantischen Glaskuppelbau einsperren. Auf einer Fläche von knapp zwei Fußballfeldern umschloss dieser einen Regenwald, eine Wüste, eine Savanne, eine Marschlandschaft, einen Ozean, Äcker und einen Wohnbereich. In diesem künstlichen Ökosystem, der sogenannten BIOSPHERE II, wollten die Forscher zwei Jahre lang leben – ohne Zufuhr von Luft oder Nahrung von außen. Doch daraus wurde nichts. Anders als vorausberechnet war in dem Hightech-Glashaus schon nach wenigen Wochen die Luft knapp. Sauerstoff musste zugeführt werden. Trotzdem starben nach und nach viele Tiere und Pflanzen. Ameisen und Kakerlaken wurden dagegen zur Plage. Nach exakt zwei Jahren und zwanzig Minuten trat die Mannschaft erschöpft und zerstritten ins Freie. Das 200-Millionen-Dollar-Projekt war gescheitert.

Ein Grund für das Scheitern war, dass natürliche Wechselwirkungen und lebenswichtige Zyklen wie der Sauerstoff- und der **Kohlenstoffkreislauf** viel zu wenig berücksichtigt wurden. Am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena erforschen Wissenschaftler unterschiedlicher Fachrichtungen genau diese Stoffkreisläufe zwischen der Erdoberfläche, der Atmosphäre und den Meeren. Sie wollen herausfinden, wo und in welchem Umfang die verschiedenen Stoffe gespeichert und wie die Stoffflüsse gesteuert werden. Am Computer simulieren sie diese Vorgänge. Es geht

vor allem um eine Frage: Welchen Einfluss hat der Mensch auf die natürlichen Kreisläufe und was sind die Folgen?

Derzeit leben mehr als 7,8 Milliarden Menschen auf der Erde (Stand Dezember 2020). Jede Sekunde kommen durchschnittlich zwei bis drei weitere hinzu. Mehr als die Hälfte der Landfläche ist durch den Menschen bereits verändert worden, mit gravierenden Folgen für die natürliche Vegetation und Artenvielfalt, die Beschaffenheit der Böden und globale Stoffkreisläufe wie den des Kohlenstoffs. In der Natur wird Kohlenstoff in Form von **Kohlenstoffdioxid** (CO_2) ständig zwischen der Atmosphäre, der Hydrosphäre (Wasser und Eis), der Lithosphäre (Gesteine) und der Biosphäre (Flora und Fauna) ausgetauscht (**Abb. A**). Manche Gebiete oder Ökosysteme geben dabei mehr CO_2 in die Atmosphäre ab, als sie aufnehmen (**CO_2 -Quellen**). Andere wiederum speichern CO_2 , indem sie es in Form anderer Kohlenstoffverbindungen binden (**CO_2 -Senken**).

Unter natürlichen Bedingungen sind die globalen Aufnahme- und Abgabeprozesse fast ausgeglichen. Der Mensch aber zerstört dieses Gleichgewicht, vor allem durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern. Dadurch setzt er gewaltige Mengen an CO_2 frei, dessen Kohlenstoff zuvor über Jahrmillionen in Form von Kohle, Gas und Öl gespeichert war. Rund 45 Prozent dieser anthropogenen CO_2 -Emissionen verbleiben in der Atmosphäre, der Rest wird von den Meeren und der Landbiosphäre wieder aufgenommen.

Eine zentrale Rolle spielen dabei die Ozeane, vor allem aufgrund der guten Löslichkeit von CO_2 in Wasser. Mit der Erhöhung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration nimmt deren Kapazität allerdings ab. Forscher registrieren zudem gravierende Änderungen der Wasserchemie: Ein Teil des gelösten CO_2 reagiert zu Kohlensäure, die den pH-Wert des Wassers senkt – die Ozeane werden saurer. Durch die CO_2 -Emissionen ist der pH-Wert des Oberflächenwassers bereits von 8,2 (vorindustriell) auf 8,1 gesunken. Auf der logarithmischen pH-Skala bedeutet dies, dass das Wasser um 30 Prozent saurer geworden ist. Die **Ozeanversauerung** beeinträchtigt die Kalkbildung und bewirkt, dass sich die Schalen und Skelette von Meerestieren wie Muscheln, Schnecken oder Korallen buchstäblich auflösen.

Ein weiterer Teil des CO_2 wird im Ozean vom marinen Plankton fixiert. Nach dem Absterben der Lebewesen sinkt das organische Material auf den Meeresgrund und nimmt dabei den gebundenen Kohlenstoff mit sich. Etwa 25 Prozent des Kohlenstoffs, der im oberen Ozean durch Fotosynthese gebunden wird, sinkt so in die Tiefe – ein Prozess, den Wissenschaftler als „**biologische Pumpe**“ bezeichnen. Ein kleiner Teil lagert sich in den Sedimenten ab, der Rest wird durch Zersetzung in gelöste anorganische Kohlenstoffverbindungen zurückverwandelt und gelangt mit aufsteigendem Wasser wieder an die Oberfläche.

Die größte Kohlenstoffsенке neben den Ozeanen ist die Landbiosphäre. Über die Fotosynthese fixieren die Pflanzen große Mengen an CO_2 .

Durch die Atmung und den Nährstoffkreislauf zwischen Pflanzen, Tieren und Bodenorganismen gelangt das CO_2 von dort aus wieder in die Atmosphäre, und zwar wesentlich schneller als beim marinen Kohlenstoffkreislauf. Enorme Mengen an CO_2 werden auch durch Feuer, insbesondere Brandrodung, freigesetzt (siehe GEOMAX 24). Gleichzeitig gehen durch die fortschreitende Waldzerstörung wichtige CO_2 -Speicher verloren.

FAKTOR MENSCH

Für das Weltklima spielt CO_2 eine entscheidende Rolle: Gemeinsam mit anderen Spurengasen und Wasserdampf bildet es eine Schicht in der Troposphäre, die das einfallende Sonnenlicht durchlässt und die langwellige Wärmestrahlung auf der Erde zurückhält. Ohne diesen **natürlichen Treibhauseffekt** betrüge die durchschnittliche Temperatur auf der Erde lediglich -18°C anstatt aktuell $+15^\circ\text{C}$. Der **anthropogene**, also vom Menschen verursachte **Treibhauseffekt** bewirkt dagegen, dass sich die Erde mehr und mehr aufheizt. Neben CO_2 tragen vor allem Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O) dazu bei.

Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre hat sich seit Beginn der Industrialisierung stark erhöht, von 280 ppm (parts per million) auf derzeit 410 ppm. Die Hauptursache für die steigenden CO_2 -Emissionen ist die Nutzung fossiler Energieträger (Abb. B). Die weltweit beobachteten Temperaturen von Land- und Ozean-Oberflächen sind zwischen 1880 und 2012 um $0,87^\circ\text{C}$ gestiegen. In den vom Weltklimarat IPCC untersuchten Szenarien, die von strengem Klimaschutz bis hin zu ungebremsten Treibhausgas-Emissionen reichen, könnte die mittlere globale Erdoberflächentemperatur bis zum Ende dieses Jahrhunderts gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter um $0,9$ bis $5,4^\circ\text{C}$ ansteigen.

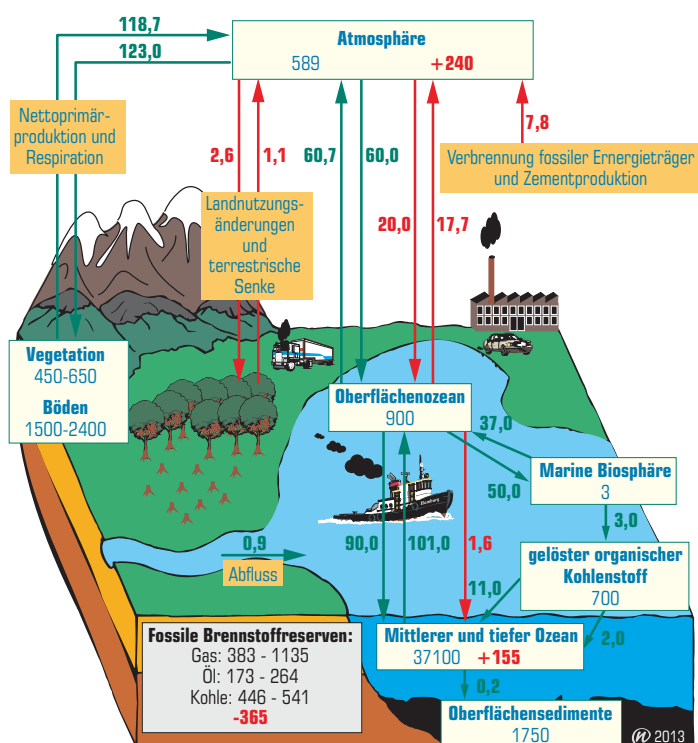
Die Folgen der **Klimaerwärmung** sind bereits heute spürbar: Das Eis von Gletschern und Polkappen schmilzt, Permafrostböden tauen auf. Im Zeitraum von 1901 bis 2010 ist der mittlere globale Meeresspiegel um ca. 19 cm gestiegen. Seit 1950 zeichnen sich Veränderungen extremer Wetter- und Klimaereignisse ab: Kalte Temperaturextreme gehen zurück, heiße nehmen zu. Auch ungewöhnlich hohe Meeresspiegelstände oder extreme Niederschläge häufen sich. Forscher u.a. des Max-Planck-Instituts für Chemie haben errechnet, dass ab 2050 viele Gegenden in Nordafrika und im Nahen Osten durch extreme Hitze unbewohnbar werden könnten. Teile von Bangladesch oder der pazifische Inselstaat Kiribati werden dagegen in absehbarer Zeit überspült. Die Zahl der **Klimaflüchtlinge** wird daher in Zukunft dramatisch ansteigen.

FEILSCHEN UMS WELTKLIMA

Ende 2015 unterzeichneten 195 Staaten das **Pariser Klimaabkommen**. Um die schlimmsten Folgen des Klimawandels abzuwenden, soll die Erderwärmung auf deutlich unter 2°C , möglichst sogar auf $1,5^\circ\text{C}$ begrenzt werden. Dazu haben sich die Länder verpflichtet, den Netto-Ausstoß ihrer Treibhausgase in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auf null zu senken. Das bedeutet, dass nur so viele Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen dürfen, wie ihr gleichzeitig – etwa durch Baumpflanzungen – wieder entzogen werden. Fossile Energieträger wären dann kaum noch nutzbar.

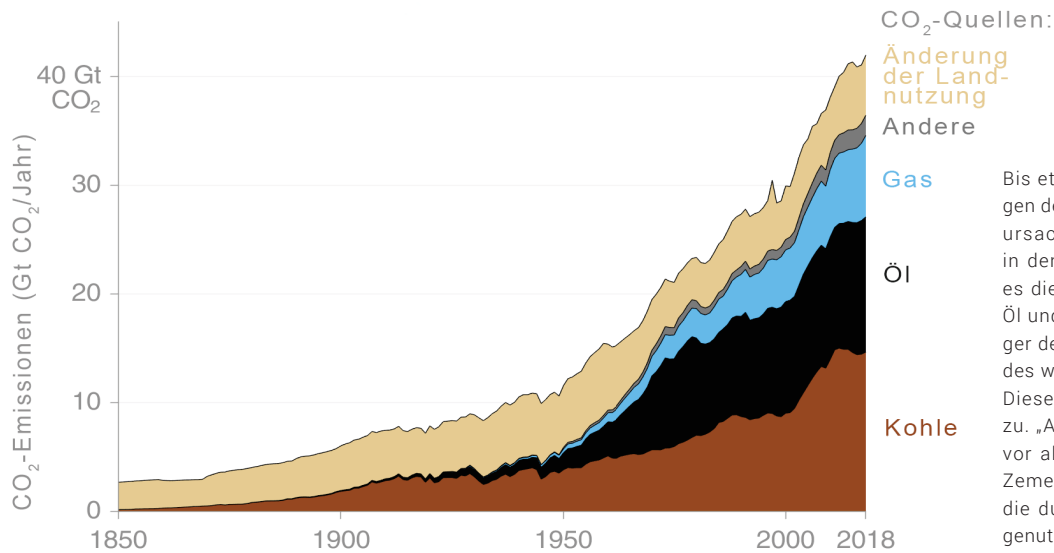
Die Pariser Vereinbarung gilt als Meilenstein im Kampf gegen die Klimaerwärmung. Kritiker bemängeln, dass das Abkom-

Abb. A: DER GLOBALE KREISLAUF DES KOHLENSTOFFS



Die Zahlen geben die Menge an gespeichertem Kohlenstoff sowie die jährlichen Flüsse an, gemessen in Gigatonnen (Gt = Milliarden Tonnen; 1 t C entspricht $3,67 \text{ t CO}_2$; Daten nach IPCC 2013). Die grünen Pfeile und Werte zeigen die natürlichen Austausche, die blauen Zahlen repräsentieren die vorindustrielle Zeit (um 1750) und rote Zahlen und Pfeile die anthropogenen Flüsse (Mittelwert der Jahre 2000 bis 2009). Die roten Werte in den Kohlenstoffspeichern geben die gesamten, durch den Menschen verursachten Änderungen seit Beginn der Industrialisierung an.

Abb. B: WELTWEITER CO₂-AUSSTOSS



men lediglich auf die freiwillige Umsetzung in den einzelnen Staaten setzt. Druckmittel oder Sanktionen, um Staaten dazu zu bewegen, ihre Klimazusagen einzuhalten, sind nicht vorgesehen. Nur so konnte allerdings erreicht werden, dass möglichst viele Länder weltweit den Klimavertrag anerkennen. Jedes Land soll daher selbst über seinen Beitrag entscheiden. Die bisherigen nationalen Klimaschutzpläne reichen jedoch bei Weitem nicht aus, um die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen.

Da CO₂ viele Jahrtausende in der Atmosphäre überdauert und das Klima aufheizt, muss auch der vergangene Ausstoß seit Beginn der Industrialisierung berücksichtigt werden. Um etwa das 1,5-Grad-Ziel nicht zu verfehlen, könnten, gerechnet ab Ende 2020, noch knapp 297 Milliarden Tonnen (Gigatonnen, Gt) CO₂ in die Atmosphäre abgegeben werden. Momentan emittiert die Welt noch immer jedes Jahr rund 42 Gt CO₂ – 1332 Tonnen pro Sekunde! Das 1,5-Grad-Ziel scheint bereits utopisch: Die menschengemachte Erwärmung erreichte bereits im Jahr 2017 etwa 1 °C über vorindustriellem Niveau. Derzeit nimmt die globale Temperatur pro Jahrzehnt um 0,2 °C (+/- 0,1 °C) zu. Mit der aktuellen Geschwindigkeit würden die globalen Temperaturen die 1,5 °C-Marke ungefähr im Jahr 2040 erreichen.

FORSCHER FAHNEN NACH DEM KOHLENSTOFF

Für Klimaprognosen und effektive Klimaschutzmaßnahmen ist es wichtig zu wissen, wo wie viel CO₂ freigesetzt wird beziehungsweise „verschwindet“. Das Team um Julia Marshall, Forschungsgruppenleiterin am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena errechnet daher den aktuellen räumlichen und zeitlichen CO₂-Austausch zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre: die CO₂-Flüsse. Diese variieren von Jahr zu Jahr, von Region zu Region und von Sommer zu Winter. Die Schwankungen kommen dadurch zustande, dass die natürlichen Prozesse des Kohlenstoffaustauschs, wie etwa die Photosynthese, der Abbau organischer Stoffe im Erdreich oder die Lösung und Umsetzung von CO₂ im Meerwasser von der Temperatur und vielen anderen Umweltfaktoren beeinflusst werden.

Um herauszufinden, wie sich die verschiedenen Faktoren auswirken, simulieren die Forscher die tatsächlichen Vorgänge mithilfe von hochkomplexen Rechenmodellen. Diese berücksichtigen sowohl die

Vorkenntnisse über die Prozesse als auch ihre Unsicherheiten. Als Grundlage für die Berechnungen dienen Freilanddaten aus zwei unterschiedlichen Quellen: Bodenbasierte Messstationen sind in der Lage, die Konzentrationen von Spurengasen wie CO₂ direkt aufzuzeichnen (Abb. C). Sie werden von mehreren internationalen Institutionen betrieben, darunter auch die Max-Planck-Institute für Biogeochemie und Chemie. Problematisch ist, dass die Stationen ungleichmäßig über den Erdball verteilt sind und aus klimatisch wichtigen Regionen wie den Tropen oder Sibirien nur wenige Daten liefern.

Eine viel bessere Datenabdeckung liefern Satellitensensoren. Das Messprinzip beruht auf der Eigenschaft des Kohlenstoffdioxids, reflektiertes Sonnenlicht bei bestimmten Wellenlängen zu absorbieren. Die Sensoren können somit den gesamten Anteil an CO₂-Molekülen in der Luftsäule zwischen dem Satelliten und der Erdoberfläche bestimmen. Teilt man diesen CO₂-Anteil durch die Menge aller Luftmoleküle in der Säule, erhält man die säulenintegrierte Konzentration von Kohlenstoffdioxid, XCO₂.

Der erste Satellitensensor, der Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid und Methan nahe der Erdoberfläche mit hoher Empfindlichkeit messen konnte, war SCIAMACHY (*Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric CHartography*). Er war von 2002 bis 2012 auf dem europäischen Umweltsatelliten ENVISAT in Betrieb. Seine Messungen führten zu einem neuen Verständnis der Methan-Quellen, wiesen allerdings systematische Fehler und Unsicherheiten der XCO₂-Messungen auf. Das erschwerte die Datenanalyse, zumal damals unabhängige Messungen zur Validierung fehlten. Seit 2009 registriert der japanische Satellit GOSAT (*Greenhouse Gases Observing Satellite*) XCO₂ und XCH₄ (Methan) mit deutlich geringerer Messunsicherheit; zusätzlich misst seit 2014 der NASA-Satellit OCO-2 (*Orbiting Carbon Observatory 2*) XCO₂ mit einer noch höheren räumlichen Auflösung. Ein Nachteil der Satellitensensoren ist, dass Wolken und Dunkelheit die Messperiode begrenzen, mit deutlich weniger Messungen im Winter in den höheren Breitengraden.

KLIMADETEKTIVE AUF FEHLERSUCHE

Mit beiden Messmethoden haben die Max-Planck-Forscher bereits eine Fülle von Daten generiert. Deren Interpretation ist

Abb. C: KLIMAFORSCHUNG IN LUFTIGER HÖHE



Einige der bodenbasierten Messstationen befinden sich auf hohen Türmen, so wie hier ZOTTO (Zotino Tall Tower Observatory) in der Sibirischen Taiga. Mit 304 Metern ist seine Stahlkonstruktion fast so hoch wie der Eiffelturm. Die Präzisionsinstrumente zur Messung von Kohlenstoffdioxid, Methan und anderen Treibhausgasen erreichen damit Luftschichten, die frei sind von lokalen Einflüssen. Dies erlaubt Rückschlüsse auf Klimaprozesse viel größerer Regionen. ZOTTO ist seit 2006 in Betrieb und wird von der Max-Planck-Gemeinschaft gemeinsam mit russischen Partnern betrieben.

allerdings alles andere als einfach: Vergleicht man nämlich die satellitenbasierten Schätzungen der CO₂-Flüsse (GOSAT-Flüsse) mit denjenigen, die auf Daten des Bodenmessnetzes beruhen (Messnetzflüsse), ergeben sich signifikante Unterschiede. „Die GOSAT-Flüsse weisen im Gegensatz zu den Messnetzflüssen darauf hin, dass die Tropen eine große CO₂-Quelle für die Atmosphäre darstellen. Demgegenüber nehmen die nördlichen mittleren Breiten deutlich mehr CO₂ aus der Atmosphäre auf“, erklärt Julia Marshall.

Wie kommen diese Unterschiede zustande? Interessanterweise nähern sich die boden- und satellitenbasierten Flussabschätzungen einander an, wenn nur Satellitenmessungen innerhalb eines bestimmten Abstands einer Bodenmessstation in die

Berechnungen einfließen. Die Diskrepanzen beruhen also offenbar auf der unterschiedlichen räumlichen Datenabdeckung. Experimentelle Berechnungen bestätigen dies. Sie ergaben, dass die spärlich verteilten Bodenmessstationen die tatsächliche räumliche Verteilung der CO₂-Flüsse nicht wiedergeben können. Das spricht für die Verlässlichkeit der GOSAT-Messungen.

Derzeit sammeln die Forscher unabhängige Referenzmessungen, um die GOSAT-Flüsse zu validieren. Die Daten stammen aus Fernerkundung und von Flugzeugmissionen, darunter das Forschungsflugzeug HALO (*High Altitude and Long Range Research Aircraft*), an dem die Max-Planck-Institute für Biogeochemie, Chemie und Meteorologie beteiligt sind. Doch auch hier gilt es, die Ergebnisse auf mögliche Fehlerquellen abzuklopfen. Da sich Fernerkundungsdaten per Satellit nur unter wolkenfreien Bedingungen gewinnen lassen, prüfen die Wissenschaftler, ob dies womöglich zu einer Verzerrung der berechneten CO₂-Flüsse führt: „Wenn die Sonne scheint, nehmen die Pflanzen in unseren Breiten über die Fotosynthese mehr CO₂ auf als bei bedecktem Himmel. In den Tropen ist es oft umgekehrt“, sagt Julia Marshall. Mit aufwändigen Simulationen testen die Wissenschaftler, wie sich dies auf die Berechnungen auswirkt. Die Jenaer Forscher unterstützen auch die Entwicklung neuer Satellitenmissionen, etwa die deutsch-französische Mission MERLIN (*Methane Remote Sensing LIDAR Mission*), die 2021 starten und das Methan in der Atmosphäre überwachen soll. Ab dem Jahr 2025 ist im Rahmen des Copernicus-Erdbeobachtungsprogramms der Start mehrerer ESA-Satelliten geplant, die das atmosphärische CO₂ noch kleinräumiger erfassen. So wollen Klimaforscher in Zukunft etwa anthropogene CO₂-Quellen gezielt aufspüren.

Schlüsselbegriffe

Biologische Pumpe, CO₂-Quellen, CO₂-Senken, Klimaerwärmung, Klimaflüchtlinge, Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffkreislauf, natürlicher/anthropogener Treibhauseffekt, Ozeanversauerung, Pariser Klimaabkommen

Buch-Tipp

- Latif, Mojib (2020): **Heißzeit**. Verlag Herder, Freiburg

Link-Tipps

- **Themenseite Klima**
www.mpg.de/g221 ➤ QR
- **Weltklimarat IPCC**
www.mpg.de/g222
- **Klimaspiel: Globale Kooperation**
www.mpg.de/g223
- **Klimaflüchtlinge**
www.mpg.de/g224
- **Arktische Eisschmelze**
www.mpg.de/g225



Video-Tipp

- **Ökozid - Klimasünder vor Gericht**
www.mpg.de/g226 ➤ QR



www.max-wissen.de

der Link zur Forschung
für Lernende und Lehrkräfte

