



Freitag, 18. September 2026, 15:00 Uhr
~22 Minuten Lesezeit

Das Molekül des Grauens

CO₂ wird schon lange zum Angstgegner aufgebaut — niemand spricht darüber, wie wichtig es für das Ökosystem ist und welche anderen Gründe es für den Klimawandel gibt.

von Uwe Froschauer
Bild: Collage mit Fotos von (Fusiness)

Kaum ein Stoff steht heute derart im Zentrum der

Klimadebatte wie Kohlendioxid. CO_2 soll reduziert, besteuert, gespeichert und möglichst vermieden werden. Ganze Wirtschaftsbereiche werden umgebaut, politische Programme darauf ausgerichtet und uns wird vorgerechnet, welchen „ CO_2 -Fußabdruck“ unser Leben hinterlässt. Doch bevor ein natürlicher Bestandteil unserer Atmosphäre zum politischen Maßstab für nahezu alles wird, sollte man sich mit der Frage befassen, was CO_2 eigentlich ist – und welche Rolle es für das Leben auf der Erde spielt.

1. Was ist CO_2 ?

Kohlendioxid ist eine chemische Verbindung aus einem

Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen – daher die Formel CO_2 . Es ist farb- und geruchlos und ein natürlicher Bestandteil der Erdatmosphäre. Es entsteht bei zahlreichen natürlichen Prozessen, etwa bei der Atmung von Lebewesen, bei der Zersetzung organischen Materials, bei Vulkanausbrüchen und beim Austausch zwischen Ozeanen und Atmosphäre. Gleichzeitig wird CO_2 von Pflanzen, zahlreichen Algen und anderen photosynthetisch aktiven Organismen – beispielsweise Cyanobakterien – aufgenommen und zum Aufbau organischer Substanz genutzt.

Damit befindet sich CO_2 seit Jahrmillionen in einem gewaltigen natürlichen Kreislauf zwischen Atmosphäre, Ozeanen, Böden, Gesteinen und Lebewesen. Der Mensch hat diesen Kreislauf nicht geschaffen. Er war lange vor uns da.

 **Kohlendioxid ist für das Leben auf der Erde**

unverzichtbar. Pflanzen benötigen es für die Photosynthese. Ohne CO₂ gäbe es keine Pflanzenwelt, wie wir sie kennen, und damit auch nicht die Nahrungsketten, von denen Tiere und Menschen abhängen.

CO₂ ist deshalb zunächst einmal kein „Klimakiller“. Es ist ein natürlicher und lebensnotwendiger Bestandteil unserer Atmosphäre. Das bedeutet selbstverständlich nicht, dass seine mögliche Wirkung auf das Klima damit vom Tisch wäre. Kohlendioxid besitzt nachweisbare strahlungsphysikalische Eigenschaften: CO₂-Moleküle können Infrarotstrahlung in bestimmten Wellenlängenbereichen aufnehmen und wieder abgeben. Gemeint ist damit die für unsere Augen unsichtbare Wärmestrahlung, die von der erwärmten Erdoberfläche abgegeben wird. CO₂ reagiert dabei nicht auf jede Wellenlänge gleichermaßen, sondern nur auf bestimmte Bereiche dieser Strahlung. Was daraus für die Temperatur der bodennahen Atmosphäre und der Erdoberfläche folgt, ist eine wesentlich tiefergehende Frage.

Der Weltklimarat der Vereinten Nationen, der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), schreibt dem zusätzlichen CO₂ eine bedeutende Erwärmungswirkung zu. Seine Berechnungen berücksichtigen dabei sowohl die unmittelbare Strahlungswirkung des Kohlendioxids, als auch Rückkopplungen mit Wasserdampf, Wolken, Eis und anderen Bestandteilen des Klimasystems.

An diesem Punkt beginnt eine wissenschaftliche Kontroverse, die in der öffentlichen Diskussion meines Erachtens viel zu selten sichtbar wird. Kritiker der vorherrschenden Interpretation – deren Argumente in meinen Augen oftmals wesentlich schlüssiger sind – stellen nicht unbedingt infrage, dass ein CO₂-Molekül Infrarotstrahlung absorbieren kann. Sie bestreiten vielmehr, dass daraus die dem CO₂ zugeschriebene starke Temperaturwirkung im

realen Klimasystem abgeleitet werden kann. Zu diesen Kritikern gehört beispielsweise der Ingenieur Michael Limburg, Mitgründer des Europäischen Instituts für Klima und Energie (EIKE), der sich seit Jahren gegen die gängige Interpretation des Treibhauseffekts wendet.

Wer hier recht hat, möchte ich an dieser Stelle nicht bewerten. Entscheidend ist die Physik. Deshalb werde ich im nächsten Teil genauer untersuchen, was CO₂ mit Wärmestrahlung tatsächlich macht, welche Rolle der in der Atmosphäre wesentlich häufiger vorkommende Wasserdampf spielt und wie aus diesen physikalischen Vorgängen schließlich eine bestimmte Temperaturwirkung berechnet wird.

Im vorliegenden Teil geht es zunächst um etwas anderes: Was ist CO₂, welche Bedeutung besitzt es für das Leben, wie stark hat seine Konzentration im Laufe der Erdgeschichte geschwankt und wie bewegt sich Kohlenstoff zwischen Atmosphäre, Pflanzen, Böden und Ozeanen?

2. CO₂-Konzentration in der Atmosphäre

Zunächst möchte ich einen Blick auf Größenordnungen in der Atmosphäre werfen.

Vor Beginn der Industrialisierung lag die atmosphärische CO₂-Konzentration bei ungefähr 280 ppm. „ppm“ bedeutet parts per million, also Teile pro Million. Vereinfacht ausgedrückt: Auf eine Million Moleküle trockener Luft – also der Luftbestandteile ohne den stark schwankenden Wasserdampf – kamen ungefähr 280 CO₂-Moleküle. Heute liegt die Konzentration bei etwas mehr als 420 ppm. Das entspricht gut 0,04 Prozent der Atmosphäre. Nochmals zur Veranschaulichung: Von 10.000 Molekülen trockener Luft in der

Atmosphäre sind etwas mehr als 4 Moleküle Kohlendioxid.

Die Konzentration ist also mengenmäßig ausgesprochen klein, zugleich aber seit vorindustrieller Zeit um ungefähr die Hälfte gestiegen. Beides sind Fakten. Wer lediglich darauf verweist, dass CO₂ nur gut 0,04 Prozent der Atmosphäre ausmacht, hat damit noch nicht bewiesen, dass es klimatisch bedeutungslos wäre. Umgekehrt folgt aus der gestiegenen CO₂-Konzentration aber auch nicht, dass sich jede beobachtete Klimaveränderung monokausal auf CO₂ zurückführen ließe.

Der IPCC geht davon aus, dass der Mensch einen sehr großen Einfluss auf die gegenwärtige Klimaentwicklung hat. Nach seinem sechsten Sachstandsbericht ist die seit dem späten 19. Jahrhundert beobachtete globale Erwärmung im Wesentlichen auf menschliche Einflüsse zurückzuführen – vor allem auf den Ausstoß von Treibhausgasen.

Für den Zeitraum 2010 bis 2019 schätzt er die vom Menschen verursachte Erwärmung gegenüber 1850 bis 1900 auf rund 1,07 Grad Celsius. Natürlichen Faktoren wie Veränderungen der Sonnenaktivität oder Vulkanausbrüchen schreibt er für diese langfristige Erwärmung dagegen nur einen vergleichsweise kleinen Beitrag zu.

Eine interessante Rolle spielt in diesem Zusammenhang der Wasserdampf. Obwohl er selbst ein bedeutendes Treibhausgas ist, wird er vom IPCC – entsprechend der etablierten Klimaphysik – anders eingeordnet als CO₂: überwiegend als Rückkopplung und nicht als eigenständiger langfristiger Antrieb. Was mit einer solchen Rückkopplung gemeint ist, lässt sich an einem einfachen Beispiel zeigen: Steigt die Temperatur zunächst aus einem *anderen* Grund – etwa weil Veränderungen der Erdbahn über lange Zeiträume die Verteilung der Sonneneinstrahlung verändern –, kann dadurch

mehr (oder auch weniger) Wasser verdunsten und der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre zunehmen. Dieser zusätzliche Wasserdampf kann wiederum die bereits begonnene Erwärmung verstärken. In der etablierten Klimaphysik gilt Wasserdampf deshalb überwiegend als Verstärker einer bereits angestoßenen Temperaturänderung und weniger als deren ursprünglicher langfristiger Auslöser.

Ob diese Einordnung der tatsächlichen Rolle des Wasserdampfs im Klimasystem vollständig gerecht wird, ist allerdings eine Frage, auf die ich im nächsten Teil noch zurückkommen werde.

Ich habe erhebliche Zweifel an der vorherrschenden Auffassung, Kohlendioxid sei der entscheidende Treiber der gegenwärtigen Erwärmung. Die Erde kam Mitte des 19. Jahrhunderts aus der Kleinen Eiszeit, einer mehrere Jahrhunderte dauernden kühleren Klimaphase. Dass sich das Klima anschließend erwärmte, ist zunächst eine historische Beobachtung. Daraus allein lässt sich jedoch noch nicht ableiten, wodurch diese Erwärmung verursacht wurde.

Nach meinem Dafürhalten ist doch die Frage, wie zuverlässig sich der menschliche Anteil von natürlichen Schwankungen und anderen Einflussfaktoren trennen lässt. Werden natürliche Prozesse dabei unterschätzt, kann entsprechend auch die Zuschreibung des menschlichen Anteils zu hoch ausfallen. Ob und in welchem Umfang das der Fall ist, wird im nächsten Teil unter die Lupe genommen.

Dabei wäre es allerdings zu einfach, die Einschätzung des IPCC kurzerhand beiseitezuschieben. Sie beruht nicht lediglich darauf, CO₂- und Temperaturkurven nebeneinanderzulegen. In seine Bewertung fließen Messdaten und physikalische Grundlagen ebenso ein wie Klimamodelle, Rekonstruktionen früherer Klimaperioden und sogenannte Attributionsstudien. Mit deren Hilfe versuchen Wissenschaftler abzuschätzen, welchen Anteil unterschiedliche

natürliche und menschliche Einflussfaktoren an beobachteten Klimaveränderungen haben.

Das bedeutet freilich nicht, dass die Arbeit des IPCC selbst keiner kritischen Betrachtung bedarf. Auch hier stellen sich für mich Fragen nach institutionellen Interessen, politischen Rahmenbedingungen und Beeinflussungen sowie danach, wer Forschung finanziert und welche Fragestellungen dadurch möglicherweise bevorzugt werden – nach dem Grundsatz *cui bono?* – wem nützt es?

Diese institutionelle Ebene möchte ich an dieser Stelle jedoch zunächst beiseitelassen und zur wissenschaftlichen Argumentation zurückkehren. Denn auch dort liegt eine maßgebliche Schwierigkeit: Solche Zuordnungen beruhen nicht ausschließlich auf unmittelbar messbaren Größen, sondern auch auf Modellen, Annahmen und statistischen Verfahren und sind deshalb mit Unsicherheiten behaftet. Die maßgebliche Frage lautet für mich daher nicht, ob der Mensch das Klima beeinflusst. Das tut er. Entscheidend ist vielmehr, wie groß dieser Einfluss im Verhältnis zu den natürlichen Faktoren tatsächlich ist, mit welcher Sicherheit sich die verschiedenen Einflüsse voneinander trennen und quantifizieren lassen – und wie viel Gewissheit sich daraus für Entwicklungen in mehreren Jahrzehnten ableiten lässt. Diese Frage möchte ich an dieser Stelle bewusst offenlassen. Sie gehört in den nächsten Teil, in dem es um CO₂, Treibhauseffekt und Klimasensitivität gehen wird.

3. CO₂ – Rohstoff des Lebens

Hinzu kommt eine weitere Ebene, die in der politischen Diskussion leicht untergeht: CO₂ ist eben nicht nur Treibhausgas. Es ist gleichzeitig Rohstoff des Lebens. Der Pflanze ist es gleichgültig, ob der Mensch CO₂ politisch zum Problem erklärt. Sie nimmt

Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und baut daraus mithilfe von Licht und Wasser organische Substanz auf. Aus einem Gas, das politisch fast ausschließlich als Problem behandelt wird, entstehen Blätter, Holz, Früchte und letztlich Nahrung.

Das ist keine Meinung eines „Klimaleugners“. Das ist Biologie.

Deshalb halte ich die verbreitete sprachliche Reduzierung von Kohlendioxid auf einen „Klimakiller“ für problematisch. Ein lebensnotwendiger Naturstoff besitzt verschiedene Wirkungen gleichzeitig. Seine strahlungsphysikalischen Eigenschaften können untersucht und kritisch bewertet werden, ohne seine biologische Bedeutung kleinzureden – und seine biologische Bedeutung widerlegt umgekehrt nicht die Tatsache, dass CO₂ Infrarotstrahlung in bestimmten Wellenlängenbereichen absorbiert und emittiert. Welche Temperaturwirkung daraus im realen Klimasystem entsteht, ist eine weitergehende Frage.

Darum lohnt es sich, jene Seite des Kohlendioxids genauer zu betrachten, die in der öffentlichen Klimadebatte weniger Beachtung findet: seine Bedeutung für das Pflanzenleben. Was geschieht, wenn Pflanzen mehr CO₂ zur Verfügung steht? Warum wird in Gewächshäusern teilweise ganz bewusst zusätzliches Kohlendioxid eingesetzt? Und trägt der steigende CO₂-Gehalt tatsächlich dazu bei, dass große Teile der Erde grüner geworden sind?

Damit komme ich zu einer grundlegenden Tatsache, ohne die jede Diskussion über Kohlendioxid unvollständig bleibt:

Ohne CO₂ kein Pflanzenleben

Was bei Kohlendioxid in der politischen Debatte häufig untergeht, ist biologisches Grundwissen: Pflanzen brauchen CO₂. Nicht

irgendwann, nicht unter besonderen Umständen, sondern jeden Tag für ihr Wachstum.

Bei der Photosynthese nehmen Pflanzen Kohlendioxid aus der Luft auf. Mithilfe der Energie des Sonnenlichts und unter Verwendung von Wasser stellen sie daraus energiereiche organische Stoffe her, insbesondere Zucker. Dabei wird Sauerstoff freigesetzt. Aus diesen Grundstoffen baut die Pflanze schließlich Blätter, Stängel, Wurzeln, Holz, Blüten und Früchte auf.

Der Kohlenstoff in einem Baumstamm kommt also nicht hauptsächlich aus dem Boden. Ein erheblicher Teil der trockenen Pflanzenmasse entsteht letztlich aus Kohlenstoff, den die Pflanze zuvor als CO_2 aus der Atmosphäre aufgenommen hat. Ein unsichtbares Gas aus der Luft wird zu Holz, Getreide, Obst und Gemüse – und damit letztlich auch zu unserer Nahrung. Fantastisch, oder?

CO_2 als Dünger

Dass mehr CO_2 unter geeigneten Bedingungen das Pflanzenwachstum fördert, ist keine Außenseiterthese und schon gar keine Erfindung sogenannter „Klimaleugner“. Der Effekt ist seit Langem bekannt und wird als CO_2 -Düngungseffekt bezeichnet.

Gärtner und professionelle Gewächshausbetriebe machen sich diesen Zusammenhang praktisch zunutze. In geschlossenen Gewächshäusern kann die CO_2 -Konzentration gezielt erhöht werden, um Photosynthese und Pflanzenwachstum zu fördern. Das US-Landwirtschaftsministerium fasst die Wirkung sehr nüchtern zusammen: Eine erhöhte CO_2 -Konzentration kann die Photosyntheserate und damit Wachstum und Ertrag steigern.

Außerhalb des Gewächshauses behandeln wir Kohlendioxid fast ausschließlich als Problem. Innerhalb des Gewächshauses wird derselbe Stoff gezielt eingesetzt, weil Pflanzen ihn zum Wachstum benötigen.

Das ist kein Widerspruch der Natur — die Natur kennt keine Widersprüche. Es ist ein Widerspruch in der Art, wie wir über CO_2 sprechen.

Allerdings wäre es ebenso falsch, daraus die Gleichung „mehr CO_2 = immer mehr Pflanzenwachstum“ zu entwickeln. Eine Pflanze lebt schließlich nicht von CO_2 allein. Sie benötigt Licht, Wasser, geeignete Temperaturen und Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Kalium. Fehlt einer dieser Faktoren, kann zusätzliches CO_2 seine wachstumsfördernde Wirkung nur eingeschränkt entfalten.

Verschiedene Pflanzenarten reagieren unterschiedlich auf CO_2 . Besonders deutlich zeigt sich das bei den beiden großen Gruppen der sogenannten C3- und C4-Pflanzen. Zu den C3-Pflanzen gehören beispielsweise Weizen, Reis und Sojabohnen. Sie reagieren im Allgemeinen stärker auf zusätzliches CO_2 . Mais und Zuckerrohr gehören dagegen zu den C4-Pflanzen und reagieren unter normalen Bedingungen deutlich schwächer darauf. Freilandversuche bestätigen diese Unterschiede.

Man muss daraus keine neue Heilslehre machen. Aufgrund des CO_2 -Düngungseffekts sollte man nicht den Fehler machen, CO_2 zum Wundermittel zu erklären. Pflanzen leben nicht von Kohlendioxid allein. Seine wachstumsfördernde Wirkung hängt von zahlreichen weiteren Bedingungen ab. Aber ebenso wenig sollte man seine nachgewiesene Funktion für Pflanzen ausblenden, nur weil sie nicht zum verbreiteten Bild des fast ausschließlich schädlichen Kohlendioxids passt.

Damit besitzt der CO₂-Düngungseffekt auch eine Bedeutung für die Bekämpfung des Hungers: Wo höhere Erträge erzielt werden, steht grundsätzlich mehr Nahrung zur Verfügung – auch wenn Hunger selbstverständlich weit mehr Ursachen hat als die Höhe landwirtschaftlicher Erträge.

Die Erde ist grüner geworden

Besonders interessant wird es, wenn man das Gewächshaus verlässt und den gesamten Planeten betrachtet. Satelliten beobachten seit Jahrzehnten die Vegetation der Erde. Eine 2016 veröffentlichte internationale Untersuchung mit 32 Wissenschaftlern aus acht Ländern kam zu dem Ergebnis, dass zwischen einem Viertel und der Hälfte der bewachsenen Landflächen der Erde innerhalb von rund 35 Jahren eine deutliche Zunahme der Blattfläche zeigte. Vereinfacht gesagt: Große Teile der Erde sind grüner geworden.

Die Wissenschaftler untersuchten verschiedene mögliche Ursachen dieser Begrünung – darunter steigende CO₂-Konzentrationen, Stickstoffeinträge, Landnutzungsänderungen sowie Veränderungen von Temperatur, Niederschlag und Sonneneinstrahlung. Ihre Modellrechnungen führten zu dem Ergebnis, dass der CO₂-Düngungseffekt rund 70 Prozent der beobachteten Begrünung erklären könnte.

Hier ist allerdings eine Unterscheidung wichtig: Die Begrünung selbst wurde mithilfe von Satellitendaten beobachtet. Die Zuordnung, welcher Faktor welchen Anteil daran verursacht hat, beruht dagegen auf Modellrechnungen. Die 70 Prozent sind deshalb keine unmittelbar vom Satelliten „gemessene“ CO₂-Wirkung.

Diese grundsätzliche Unterscheidung sollte man bei Klimafragen immer wieder im Hinterkopf behalten: Was wurde tatsächlich

gemessen — und was wurde anschließend mithilfe eines Modells daraus abgeleitet?

Trotz dieser Einschränkung ist der grundsätzliche CO_2 -Düngungseffekt experimentell gut belegt. Jahrzehntelange sogenannte FACE-Freilandversuche, bei denen Pflanzen unter freiem Himmel erhöhten CO_2 -Konzentrationen ausgesetzt werden zeigen bei vielen Pflanzen eine erhöhte Photosynthese und Biomasseproduktion. Sie zeigen jedoch ebenso deutlich die Grenzen: Nährstoffmangel kann den Effekt abschwächen, C4-Pflanzen reagieren weniger stark, und bei manchen Nutzpflanzen kann eine höhere CO_2 -Konzentration die Konzentration bestimmter Mineralstoffe in den Samen reduzieren.

Diese unterschiedlichen Wirkungen zeigen, wie wenig die Einteilung von CO_2 in „gut“ oder „schlecht“ der Wirklichkeit gerecht wird. CO_2 ist weder ausschließlich unter dem Blickwinkel seiner Treibhauswirkung zu betrachten noch lässt es sich zum problemlosen Wundermittel erklären.

Damit stellt sich die nächste Frage: Wie hoch ist die heutige CO_2 -Konzentration im Vergleich zu früheren Erdzeitaltern?

4. CO_2 war nie konstant

Wie ordnet sich die heutige CO_2 -Konzentration in die Klimageschichte der Erde ein?

Vor Beginn der Industrialisierung lag sie bei ungefähr 280 ppm, heute bei mehr als 420 ppm. Der Anstieg ist erheblich und unstrittig. Wer daraus jedoch den Eindruck gewinnt, 280 ppm seien so etwas wie der natürliche Normalzustand der Erde, irrt. Einen über Millionen Jahre konstanten CO_2 -Gehalt hat es nicht gegeben.

Besonders aufschlussreich sind Eisbohrkerne aus der Antarktis und aus Grönland. In dem über Jahrtausende entstandenen Eis befinden sich winzige eingeschlossene Luftbläschen – gewissermaßen Proben der damaligen Atmosphäre. Dadurch lässt sich die Entwicklung des atmosphärischen CO₂ über Hunderttausende Jahre vergleichsweise zuverlässig rekonstruieren.

Während der Eiszeitzyklen der vergangenen rund 800.000 Jahre schwankte die CO₂-Konzentration grob zwischen etwa 180 ppm in ausgeprägten Kaltzeiten und 280 bis 300 ppm in Warmzeiten. Der heutige Wert von mehr als 420 ppm liegt damit deutlich über dieser jüngeren natürlichen Schwankungsbreite. Das sollte man als sogenannter Klimaleugner auch nicht verschweigen. Interessant wird es allerdings bei der Frage nach Ursache und Wirkung.

Bei vergangenen Übergängen von Kalt- zu Warmzeiten wurde die Erwärmung nicht einfach dadurch ausgelöst, dass zunächst das CO₂ anstieg. Veränderungen der Erdbahn – die bereits beschriebenen Milanković-Zyklen – veränderten die Verteilung der Sonneneinstrahlung und setzten weitere Prozesse in Gang. Eine viel zitierte Untersuchung von Nicolas Caillon und Kollegen fand beispielsweise für einen Eiszeitübergang vor etwa 240.000 Jahren, dass die antarktische Erwärmung dem CO₂-Anstieg um durchschnittlich etwa 800 ± 200 Jahre vorausging.

Das ist ein wichtiger Befund. Er bedeutet deswegen nicht, dass damit eine Klimawirkung von CO₂ widerlegt wäre. Die etablierte Erklärung lautet vielmehr, dass die anfängliche Erwärmung weitere Rückkopplungen in Gang setzte. Veränderungen der Ozeane – unter anderem ihrer Temperatur, Zirkulation und Chemie – beeinflussten die Freisetzung und Aufnahme von CO₂. Das zusätzlich in die Atmosphäre gelangende Kohlendioxid konnte nach dieser Erklärung die bereits begonnene Erwärmung wiederum

verstärken.

CO₂ war bei solchen natürlichen Klimawechseln damit nicht einfach nur Ursache oder nur Folge, sondern Teil eines komplexen Rückkopplungsprozesses. Neuere Untersuchungen zeigen zudem, dass die zeitliche Beziehung zwischen Temperatur und CO₂ nicht bei allen Eiszeitübergängen identisch ist. Die „800 Jahre“ sollte man deshalb nicht als allgemeingültige Naturkonstante missverstehen.

Man sollte generell vorsichtig sein, aus dem parallelen Verlauf zweier Kurven bereits eine eindeutige Kausalität abzuleiten. Ausschlaggebend ist, welcher Prozess eine Veränderung zunächst anstößt (sogenannter Antrieb) und welche weiteren Prozesse anschließend verstärkend (Verstärker) oder abschwächend hinzukommen.

Je weiter man in der Erdgeschichte zurückgeht, desto schwieriger wird die Rekonstruktion. Für Zeiträume von Millionen oder gar Hunderten Millionen Jahren gibt es keine Luftbläschen im Eis mehr. Wissenschaftler greifen deshalb auf sogenannte Proxydaten zurück – beispielsweise fossile Blätter, Meeresablagerungen oder geochemische Spuren in Gesteinen.

Das sind wissenschaftlich wertvolle Verfahren. Aber eine Rekonstruktion ist keine direkte Messung. Auch der IPCC weist bei bestimmten terrestrischen CO₂-Proxys auf geringe Datendichte sowie vergleichsweise große Unsicherheiten bei CO₂-Werten und Altersbestimmungen hin.

Trotz dieser Unsicherheiten ist eines ziemlich klar: In früheren Erdzeitaltern lagen die CO₂-Konzentrationen zeitweise erheblich höher als heute. Für das frühe Eozän vor rund 50 Millionen Jahren nennt der IPCC etwa 1.150 bis 2.500 ppm. Für Teile der Trias, eines Erdzeitalters vor rund 250 bis 200 Millionen Jahren, in dem auch die

ersten Dinosaurier auftraten, werden sogar Größenordnungen von 2.000 bis 5.000 ppm rekonstruiert.

Das bedeutet nicht, dass solche Werte für unsere heutige Welt automatisch harmlos wären. Kontinente und Ozeane waren anders angeordnet, Ökosysteme unterschieden sich, und auch andere Einflussfaktoren waren nicht identisch.

Es bedeutet aber sehr wohl: Die heutigen gut 420 ppm sind erdgeschichtlich keineswegs einmalig. Im Maßstab der vergangenen 800.000 Jahre sind sie außergewöhnlich hoch — über Hunderte Millionen Jahre betrachtet dagegen nicht.

Wie gewaltig die Veränderungen des Erdklimas waren, zeigt auch eine 2024 in Science veröffentlichte Rekonstruktion der vergangenen 485 Millionen Jahre. Die Forscher errechneten globale Durchschnittstemperaturen zwischen ungefähr 11 und 36 Grad Celsius. Zum Vergleich: Heute haben wir eine globale Durchschnittstemperatur von circa 15 Grad Celsius.

Über einen großen Teil dieses Zeitraums befand sich die Erde demnach in wärmeren Klimazuständen als heute.

Auch hier ist freilich Genauigkeit angebracht: Niemand hat vor 400 Millionen Jahren ein Thermometer abgelesen. Die Forscher kombinierten geologische Proxydaten mit Klimamodellen und statistischen Verfahren. Es handelt sich um eine wissenschaftliche Rekonstruktion, nicht um eine direkte Temperaturmessung. Die Studie ist keineswegs ein hundertprozentiger Beleg dafür, CO₂ für klimatisch bedeutungslos zu erklären.

Für mich folgt daraus vor allem eines: Die Erdgeschichte lässt sich weder mit dem Satz „CO₂ macht das Klima“ noch mit „CO₂ spielt keine Rolle“ angemessen beschreiben. Temperatur und CO₂ haben sich über Millionen Jahre erheblich verändert — eingebettet in ein

Klimasystem, in dem gleichzeitig Sonne, Ozeane, Eis, Vegetation, Kontinentalverschiebungen und zahlreiche Rückkopplungen wirken.

Das Klima war nie statisch. Der CO₂-Gehalt war es ebenso wenig.

Damit stellt sich zwangsläufig die nächste Frage: Woher kommt das Kohlendioxid, wohin verschwindet es wieder — und welche Rolle spielen dabei Ozeane, Pflanzen, Böden und der Mensch?

5. Der große Kreislauf des Kohlenstoffs

Kohlendioxid bleibt nicht einfach in der Atmosphäre. Der darin enthaltene Kohlenstoff ist ständig unterwegs. Er wandert zwischen Atmosphäre, Pflanzen, Böden, Ozeanen, Lebewesen und Gesteinen hin und her. Manche dieser Wege dauern nur Tage oder Jahre, andere Jahrtausende oder sogar Millionen Jahre.

Man kann sich diesen Kohlenstoffkreislauf wie ein gewaltiges System miteinander verbundener Speicher vorstellen. Die Atmosphäre ist einer davon — aber keineswegs der größte. Kohlenstoff befindet sich in Wäldern und Böden, in den Ozeanen, in Lebewesen und in gewaltigen Mengen auch in Gesteinen und Sedimenten.

Pflanzen entziehen der Atmosphäre CO₂ und bauen den darin enthaltenen Kohlenstoff durch Photosynthese in ihre Biomasse ein. Ein Baum beispielsweise macht aus Kohlendioxid, Wasser und Sonnenenergie über Jahre hinweg Blätter, Äste, Wurzeln und Holz. Stirbt die Pflanze ab, beginnt der nächste Teil des Kreislaufs: Mikroorganismen zersetzen das organische Material, wobei ein Teil des Kohlenstoffs wieder als CO₂ freigesetzt wird. Ein anderer Teil verbleibt im Boden oder wird über längere Zeiträume gespeichert.

Auch Tiere und Menschen sind Bestandteil dieses Kreislaufs. Wir nehmen Kohlenstoff über unsere Nahrung auf und geben einen Teil davon durch die Atmung wieder als Kohlendioxid an die Atmosphäre zurück.

Eine besonders große Rolle spielen die Weltmeere. Sie enthalten um ein Vielfaches mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre und tauschen ständig CO_2 mit ihr aus. An der Meeresoberfläche geschieht beides gleichzeitig: Kohlendioxid gelangt aus der Atmosphäre ins Wasser – und aus dem Wasser wieder zurück in die Atmosphäre. Bestimmend ist, in welche Richtung unter den jeweiligen Bedingungen netto mehr transportiert wird.

Dabei spielt die Temperatur eine wichtige Rolle. Kaltes Wasser kann grundsätzlich mehr CO_2 aufnehmen und gelöst halten als warmes Wasser. Man kennt das Prinzip vereinfacht von einer Flasche mit kohlensäurehaltigem Mineralwasser: Wird sie warm und geöffnet, entweicht das darin gelöste Kohlendioxid leichter. Die Vorgänge im Ozean sind natürlich wesentlich komplizierter, aber das Grundprinzip der temperaturabhängigen Löslichkeit ist dasselbe.

Deshalb kann eine Erwärmung von Meerwasser grundsätzlich die Abgabe von CO_2 begünstigen. Umgekehrt können kalte Meeresregionen besonders viel CO_2 aufnehmen. Hinzu kommen weiterhin Meeresströmungen, biologische Prozesse und die Chemie des Meerwassers. Plankton nimmt beispielsweise Kohlenstoff auf, abgestorbenes organisches Material kann in tiefere Wasserschichten absinken und Kohlenstoff damit teilweise für lange Zeit dem unmittelbaren Austausch mit der Atmosphäre entziehen.

Die Ozeane sind deshalb weder einfach nur CO_2 -Speicher noch einfach nur CO_2 -Quellen. Sie sind beides – und stehen in einem permanenten Austausch mit der Atmosphäre.

Quellen und Senken – entscheidend ist, was unter dem Strich bleibt

Damit kommen zwei Begriffe ins Spiel, die in der Klimadebatte ständig auftauchen: CO₂-Quellen und CO₂-Senken. Eine Quelle gibt netto Kohlendioxid ab, eine Senke nimmt netto Kohlendioxid auf. Das klingt zunächst einfach. In der Natur kann jedoch ein und dasselbe System gleichzeitig aufnehmen und abgeben. Nehmen wir einen Wald. Seine Bäume entziehen der Atmosphäre durch Photosynthese CO₂ und speichern Kohlenstoff in Holz, Wurzeln und Böden. Gleichzeitig setzen Pflanzen durch ihre Zellatmung sowie Bodenorganismen CO₂ frei, abgestorbenes organisches Material wird zersetzt, und bei Waldbränden kann gespeicherter Kohlenstoff innerhalb kurzer Zeit wieder freigesetzt werden.

Die maßgebliche Frage lautet deshalb nicht: Gibt ein Wald CO₂ ab? Natürlich tut er das. Entscheidend ist: Nimmt er über einen bestimmten Zeitraum mehr Kohlenstoff auf, als er wieder abgibt? Ist das der Fall, wirkt er unter dem Strich als Kohlenstoffsенke.

Dasselbe Prinzip gilt im Großen für den gesamten Planeten. Zwischen Atmosphäre, Land und Ozeanen werden jedes Jahr gewaltige Mengen Kohlenstoff ausgetauscht. Diese natürlichen Bruttoströme sind erheblich größer als die zusätzlichen menschlichen Emissionen. Ein großer Teil der natürlichen Aufnahme und Abgabe gleicht sich jedoch gegenseitig aus. Deshalb ist nicht allein die Größe eines einzelnen CO₂-Stroms maßgebend, sondern seine Bilanz.

An dieser Stelle wird auch verständlich, was mit Begriffen wie „CO₂-neutral“ oder „Netto-Null“ grundsätzlich gemeint ist. Gemeint ist nicht, dass überhaupt kein CO₂ mehr freigesetzt wird.

Ausschlaggebend ist, dass unter dem Strich nicht mehr zusätzlich in der Atmosphäre verbleibt, als an anderer Stelle wieder dauerhaft

entzogen wird. „Klimaneutral“ ist allerdings der weitergehende Begriff, weil neben CO₂ auch andere Einflüsse auf das Klima berücksichtigt werden müssen.

Der Mensch ist keineswegs der größte CO₂-Emittent innerhalb des gesamten Kohlenstoffkreislaufs. Nach den vom IPCC verwendeten Zahlen stehen anthropogenen Emissionen von rund 10,9 Milliarden Tonnen Kohlenstoff (GtC) pro Jahr – nicht zu verwechseln mit der Masse des gesamten Kohlendioxids: 10,9 Milliarden Tonnen Kohlenstoff entsprechen rund 40 Milliarden Tonnen CO₂ – natürliche Brutto-Austauschströme gegenüber, die sich auf Hunderte Milliarden Tonnen Kohlenstoff jährlich summieren. Je nachdem, welche dieser Ströme einbezogen werden, machen die menschlichen Emissionen damit nur wenige Prozent der jährlich bewegten Kohlenstoffmengen aus.

Maßgeblich ist die Bilanz: Ozeane und Landökosysteme setzen große Mengen CO₂ frei, nehmen gleichzeitig aber auch große Mengen wieder auf, sodass sich ein erheblicher Teil dieses natürlichen Austauschs gegenseitig ausgleicht. Der Mensch fügt dem Kreislauf vor allem durch die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas zusätzlichen Kohlenstoff hinzu, der zuvor über sehr lange geologische Zeiträume gebunden war; hinzu kommen Zementproduktion und Veränderungen der Landnutzung. Gemessen an den gewaltigen natürlichen Bruttoströmen erscheint der menschliche Anteil damit zunächst marginal – für die Veränderung der Bilanz ist jedoch bestimmend, was von diesem zusätzlich freigesetzten Kohlenstoff dauerhaft in der Atmosphäre verbleibt.

Von diesem zusätzlich vom Menschen freigesetzten CO₂ verbleibt eben nicht alles in der Atmosphäre. Nach den Berechnungen des IPCC nahmen Landökosysteme und Ozeane im Jahrzehnt 2010 bis 2019 zusammen etwas mehr als die Hälfte der menschlichen CO₂-

Emissionen wieder auf: rund 31 Prozent an Land und 23 Prozent in den Ozeanen; etwa 46 Prozent verblieben in der Atmosphäre.

Auch diese Bilanzierung ist nicht völlig unumstritten.

Wissenschaftler wie Hermann Harde und Murry Salby haben Modelle vorgelegt, nach denen der menschliche Anteil am beobachteten Anstieg des atmosphärischen CO₂ wesentlich geringer ausfällt als in der etablierten Kohlenstoffbilanz angenommen. Diese Auffassung wird von der Mehrheitsforschung deutlich zurückgewiesen. Aber auch Tausende Fliegen können irren, insbesondere dann, wenn die Forscher von Forschungsgeldern abhängig sind.

Die Natur ist nicht bloß CO₂-Quelle, sondern zugleich ein gewaltiger Puffer. Ohne die Aufnahme durch Vegetation, Böden und Ozeane wäre die atmosphärische CO₂-Konzentration wesentlich schneller gestiegen.

Das unfreiwillige Großexperiment von 2020

Wie komplex dieses Zusammenspiel ist, zeigte das Jahr 2020. Während der idiotischen Corona-Lockdowns wurde die wirtschaftliche Aktivität weltweit zeitweise drastisch heruntergefahren. Straßen waren leer, Flugzeuge blieben am Boden, Fabriken reduzierten ihre Produktion. Auf dem Höhepunkt der Einschränkungen lagen die täglichen weltweiten fossilen CO₂-Emissionen zeitweise schätzungsweise rund 17 Prozent unter dem Niveau des Vorjahres; über das gesamte Jahr betrachtet betrug der Rückgang ungefähr sechs bis sieben Prozent.

Man hätte deshalb vielleicht erwartet, diese außergewöhnliche Entwicklung müsse sich deutlich in der atmosphärischen CO₂-Kurve

bemerkbar machen. Doch die CO₂-Konzentration stieg erstaunlicherweise weiter an. Das macht nachdenklich, auch wenn es nicht zwangsläufig beweist, dass der Anstieg des atmosphärischen CO₂ nichts mit menschlichen Emissionen zu tun hat.

Dieses Beispiel macht einen häufig übersehenen Unterschied anschaulich: Emissionen und CO₂-Konzentration sind nicht dasselbe. Emissionen beschreiben, wie viel CO₂ innerhalb eines bestimmten Zeitraums zusätzlich freigesetzt wird. Die atmosphärische Konzentration beschreibt dagegen, wie viel CO₂ sich zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Atmosphäre befindet. Dazwischen arbeitet ununterbrochen der gewaltige Kohlenstoffkreislauf mit seinen Quellen und Senken.

Damit zeigt sich, weshalb beim Kohlenstoffkreislauf nicht einzelne Zahlen, sondern die gesamte Bilanz betrachtet werden muss: Wie viel CO₂ wird auf natürlichem Wege freigesetzt und wieder aufgenommen? Wie groß ist der zusätzliche menschliche Beitrag? Wie viel davon nehmen Ozeane und Landökosysteme auf – und wie viel verbleibt schließlich in der Atmosphäre?

In diesem Kapitel haben wir zunächst geklärt, was Kohlendioxid überhaupt ist, warum es für das Pflanzenleben unverzichtbar ist, wie stark seine Konzentration im Laufe der Erdgeschichte schwankte und wie es sich im gewaltigen Kohlenstoffkreislauf zwischen Atmosphäre, Ozeanen, Pflanzen und Böden bewegt.

Doch damit beginnt erst der umstrittene Teil der CO₂-Debatte. Denn selbst wenn feststeht, dass die CO₂-Konzentration seit Beginn der Industrialisierung deutlich gestiegen ist und der Mensch zusätzliches Kohlendioxid freisetzt, ist damit noch nicht beantwortet, welche Temperaturwirkung daraus tatsächlich folgt. Wie stark kann ein Gas, das heute etwas mehr als 0,04 Prozent der

Atmosphäre ausmacht, die Energiebilanz und damit die Temperatur unseres Planeten beeinflussen? Welche Rolle spielt dabei der Wasserdampf, der in wesentlich größeren und stark schwankenden Mengen in der Atmosphäre vorkommt? Was genau bedeutet „Treibhauseffekt“ physikalisch? Und wie sicher lässt sich aus diesen Vorgängen eine Erwärmung um eine bestimmte Zahl von Grad ableiten?

Um diese Themenkreise wird es im nächsten Teil gehen: um CO₂ und den Treibhauseffekt – um Absorption und Abstrahlung, um Wasserdampf und Rückkopplungen und schließlich um die maßgebliche Frage: Wie stark ist die Wirkung des Kohlendioxids auf das Klima tatsächlich?



Uwe Froschauer hat an der Ludwig-Maximilians-Universität München Betriebswirtschaft studiert und abgeschlossen. Sein besonderes Interesse galt der Wirtschaftspsychologie. Er arbeitete als Unternehmensberater, gibt Seminare bei Berufsbildungsträgern, ist Autor mehrerer Bücher und betreibt den Blog **wassersaenge.com** (<https://wassersaenge.com/>). Seine Leidenschaft für weltweite Reisen machte ihn sensibel für Kulturen und Probleme anderer Völker. Er ist naturverbunden und liebt Tiere und Pflanzen.