

Woher kommt das atmosphärische CO₂?

geschrieben von AR Göhring | 7. Mai 2025

Eine physikalische Betrachtung von Michael Mechtel

Der Gehalt der Atmosphäre an CO₂ steigt seit Jahrzehnten an. Hauptverantwortlich dafür soll menschliche Aktivität sein. Diese These wird durch Abgleich zweier empirischer Datensätze überprüft: Einerseits liegt die langjährige Messreihe des atmosphärischen CO₂-Gehalts der Station Mauna Loa auf Hawaii (die Keeling-Kurve) vor, zum anderen die Datenreihe des jährlichen anthropogen verursachten CO₂-Eintrags in die Atmosphäre. Es wird untersucht, ob dieser CO₂-Eintrag allein den Verlauf der Keeling-Kurve reproduzieren kann. Das Ergebnis ist eindeutig negativ, aber eine umfassende Antwort auf die Titelfrage steht noch aus.

Das „böse“ CO₂?

CO₂ steht bekanntlich im Mittelpunkt der aktuellen Diskussionen um die Klimaveränderung, wobei zwei Fragestellungen relevant sind:

1. Wie groß ist der Einfluß des CO₂ als Stellschraube fürs Klima?
2. Ist der Mensch wirklich Hauptverursacher der aktuellen CO₂-Zunahme in der Atmosphäre?

Die Antworten auf beide Fragen haben erheblichen Einfluß auf politische Entscheidungen. In diesem Beitrag wird jedoch ausschließlich die zweite Frage behandelt.

Die vorherrschende Meinung lautet, dass sich der natürliche Kohlenstoffkreislauf im vorindustriellen Zeitalter in einem Gleichgewicht befunden habe, bei dem das Konzentrationsniveau in der Atmosphäre 280 ppm betrug. Das entspricht bei gleichmäßiger Durchmischung einer Gesamt-CO₂-Masse von 2245 Gigatonnen (Gt) – der Umrechnung liegt der Faktor 8,02 Gt pro ppm zugrunde. Der seitherige Anstieg auf z.Zt. mehr als 400 ppm soll allein durch menschliche Aktivitäten verursacht sein, die CO₂ freisetzen, wie z.B. die Verbrennung fossiler Brennstoffe, Waldrodung usw. Wenn das so wäre, müsste sich die Keelingkurve aus den jährlichen anthropogenen Emissionen rekonstruieren lassen.

Sowohl für die Konzentrations- wie die Emissionswerte liegen Datenreihen über rund sechs Jahrzehnte vor. Ausgewertet wurde der Zeitraum 1960 – 2018. Die Überlegungen sind durchweg formal-mathematischer Natur, aber so gehalten, dass sie mit gewöhnlichem Schulwissen verständlich sein sollten.

Den Anstoß für die Untersuchung gab die Beobachtung, dass der atmosphärische CO₂-Gehalt (die Keelingkurve) nicht linear ansteigt, sondern überlinear, leicht parabelförmig, also einen Beitrag enthalten

muss, der mindestens quadratisch mit der Zeit wächst. Die Kurve des anthropogenen CO₂-Eintrags hingegen weist nur einen linearen zeitlichen Anstieg auf (nach Bereinigung von Schwankungen). Um die hiermit verbundene Problematik zu verstehen, zunächst eine einführende Analogie-Überlegung:

Füllt man Wasser in einen Kochtopf, und zwar, sagen wir, jede Stunde den gleichen Betrag, dann wird sich der Wasserstand linear in der Zeit erhöhen.

Steigt jedoch der Nachfüllbetrag selber linear an, wie es unserem jährlichen CO₂-Eintrag in die Atmosphäre entspricht, sagen wir, in der ersten Stunde füllen wir 50 ml nach, in der zweiten 100 ml, in der dritten 150 ml usw., dann wird der Wasserstand im Topf im Quadrat der Zeit ansteigen – und das wiederum entspricht tatsächlich dem Verhalten der Keeling-Kurve. Also alles in Ordnung?

Nein! Der Planet Erde mit seiner Lufthülle verhält sich nicht wie ein Kochtopf. Es gibt hier Senken, in denen atmosphärisches CO₂ verschwindet, wie etwa den Ozean und die Biosphäre. Diese Senken sollten aus physikalischen Gründen um so wirksamer sein, je höher die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist. Damit wird es fragwürdig, ob die quadratische Keelingkurve allein mit dem linear wachsenden menschlichen CO₂-Eintrag erklärbar ist. Im folgenden soll das näher untersucht werden.

Datengrundlage

Die veröffentlichten monatlichen Messdaten der CO₂-Konzentration sind [1] entnommen. Sie zeigen eine leicht wellige Struktur [2], die einem jahreszeitlichen Rhythmus unterliegt. Um diese Schwankungen herauszumitteln und den langfristigen Trend freizulegen, wurden die jeweiligen Jahresmittelwerte gebildet. Sie sind in Abb.1 dargestellt, umgerechnet auf die atmosphärische Gesamt-CO₂-Masse in Gigatonnen (Gt).

Zu diesem modifizierten Datensatz wurde nun eine linear-quadratische Regressionsfunktion (Parabel) als Anpassung mit der kleinsten quadratischen Abweichung berechnet. Die Parabel hat die Form

$$m(t) = A*t^2 + B*t + C.$$

t ist die Zeit in Jahren (1960: t = 0) und m die Gesamt-CO₂-Masse in der Atmosphäre. Die Regressions-Parameter dieser Parabel lauten:

$$A = 0,10023 \text{ Gt/a}^2, B = 6,88845 \text{ Gt/a} \text{ und } C = 2535,2 \text{ Gt (annus, a steht für Jahr).}$$

Auch die Regressionsparabel ist in Abb. 2 eingetragen, und es zeigt sich eine hervorragende Übereinstimmung mit den Meßdaten. Der Korrelationskoeffizient zwischen beiden Kurven ist 99.97 %.

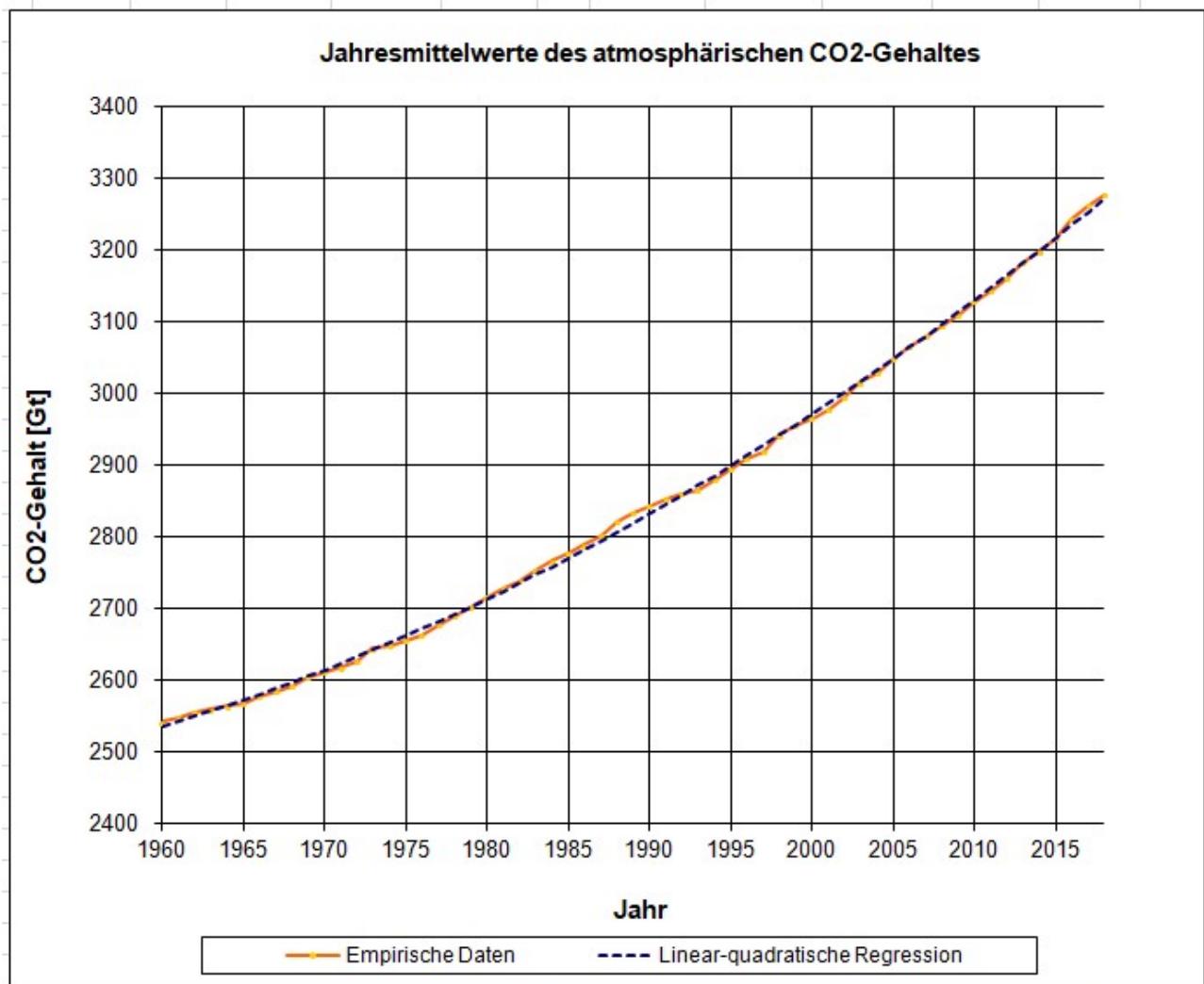


Abb. 1: CO2-Gehalt der Atmosphäre nach Messdaten der Station Mauna Loa in Gigatonnen (Gt)

Die Daten des anthropogenen CO2-Eintrags entstammen [3] und umfassen den gleichen Zeitraum. Ein quadratischer Trend ist hier nicht zu erkennen, deshalb wurde zur Bereinigung der Schwankungen eine lineare Anpassung berechnet:

$$QPktz(t) = \beta * t + QPktz_0$$

QPkt (gesprochen Q-Punkt, und Punkt steht für die zeitliche Ableitung der eingebrachten Masse) bedeutet den jährlichen Zufluss an CO₂, also einen Quellfluss. Er wird in Gigatonnen pro Jahr (Gt/a) angegeben. Der Zusatz z in QPktz steht für 'zivilisationsbedingt', also anthropogen.

Die Regressionsparameter lauten hier $\beta = 0,42231 \text{ Gt/a}^2$ und $QPktz_0 =$

10,4836 Gt/a.

Originaldaten und Ausgleichsgerade sind in Abb. 2 eingetragen. Ihr Korrelationskoeffizient beträgt 98,2 %.

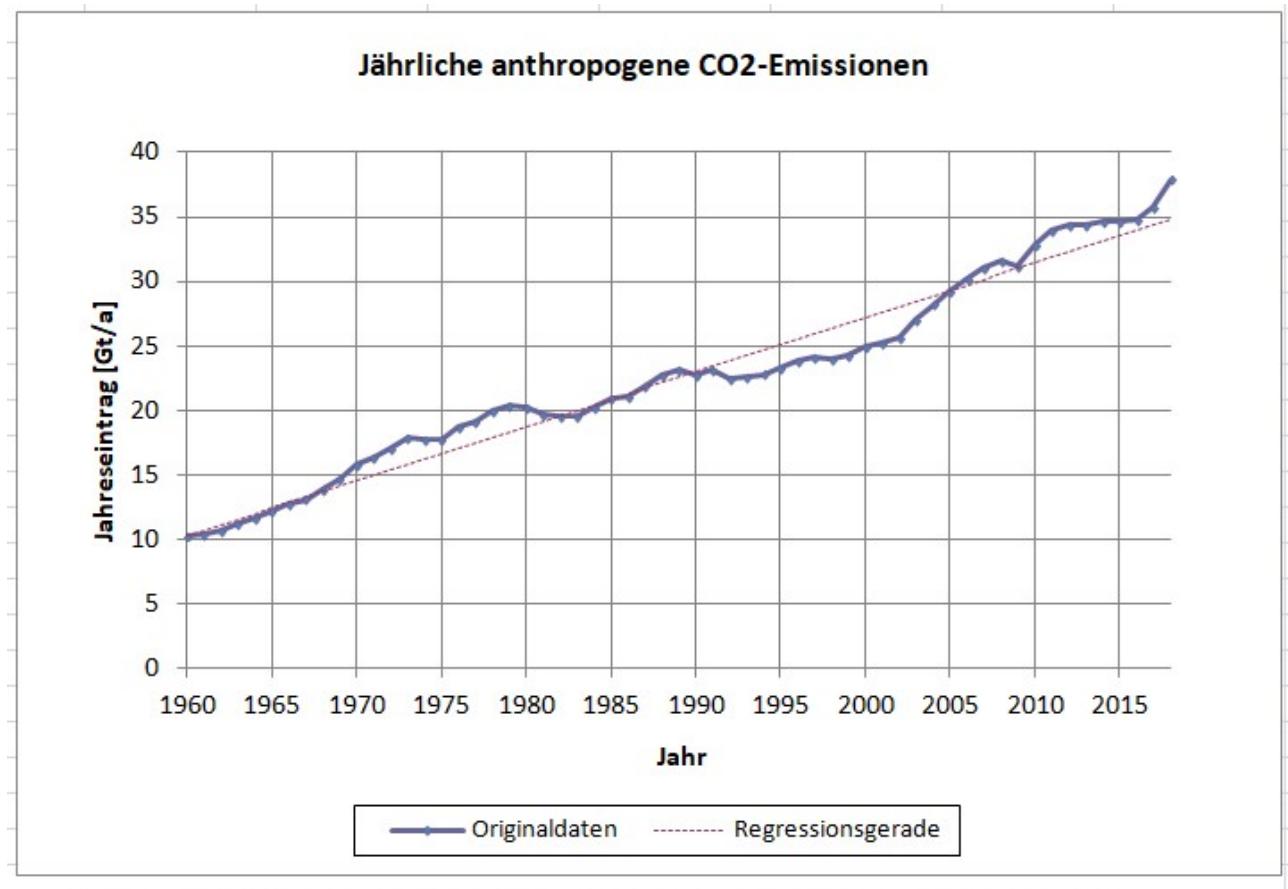


Abb. 2: Jährlicher anthropogen bedingter CO2-Eintrag in die Atmosphäre in Gt/a.

Untersuchungsmethode

Im folgenden werden wir die Regressionskurven statt die Originaldaten analysieren. Das hat den Vorteil, dass irreguläre Schwankungen eliminiert sind, was die Untersuchung wesentlich vereinfacht.

Wir gehen aus von der Grundgleichung

$$mPkt = QPkt - Spkt,$$

was nichts anderes bedeutet als: die jährliche Änderung der atmosphärischen CO2-Masse ($mPkt$) ergibt sich aus den jährlichen Zuflüssen von den Quellen ($QPkt$) abzüglich der jährlichen Abflüsse in die Senken ($SPkt$). Wir kennen $mPkt$ bereits aus der Keelingkurve. $QPkt$ betrachten wir zunächst als unbekannt, denn wir kennen wir nur den zivilisatorischen Anteil $QPktz$ (siehe Abb. 2).

Für $SPkt$ müssen wir eine Modellannahme machen, die aber gut begründet

erscheint: das Verschwinden von CO₂ in den Hauptsenken Ozean und Pflanzenwelt wird im wesentlichen als diffusiongetrieben betrachtet [4], [5]. Das hat zur Folge, dass der Senkenstrom SPkt proportional zur CO₂-Masse m in der Atmosphäre ist, mit ihr also über eine Proportionalitätskonstante alpha, die Abklingkonstante, verbunden ist:

$$SPkt = \alpha * m. \quad (1)$$

alpha wird in den hier benutzten Einheiten in 1/a gemessen (1/Jahr).

Dieser Diffusionsansatz für den Senkenfluß führt zu der wichtigen Folgerung, dass der Quellfluss selber eine Parabelform aufweisen sollte! Man erkennt das, indem man die Grundgleichung nach dem unbekannten QPkt umstellt, alle bekannten Größen einsetzt und dann nach Potenzen von t umordnet.

Wir setzen QPkt deshalb wie folgt an:

$$QPkt = U*t^2 + V*t + W. \quad (2)$$

und können dann die unbekannten Parameter U, V und W durch Koeffizientenvergleich direkt auf die bekannten Parameter A, B und C der Keelingkurve zurückführen:

$$\begin{aligned} U &= \alpha * A, \\ V &= 2 * A + \alpha * B, \\ W &= B + \alpha * C. \end{aligned}$$

Wie man sieht, muss man die Abklingkonstante alpha kennen, um die Werte zu berechnen. Dazu liefert unser Ansatz keine Vorgaben, er wird in einem breiten Wertebereich von alpha funktionieren. Die Atomwaffentests in der Atmosphäre um das Jahr 1960 herum legen den Wert alpha = 0,05 /a nahe, (Näheres siehe Anhang). Damit sind wir in der Lage, die gesuchten Koeffizienten für den jährlichen Gesamt-Zufluss QPkt zu berechnen:

$$U = 5,011E-3 \text{ Gt/a}^3, \quad V = 0,5449 \text{ Gt/a}^2 \text{ und } W = 133,65 \text{ Gt/a}.$$

Wir haben nun das Rüstzeug beisammen, um iterativ in einer Tabellenkalkulation die Regressionsparabel der Keelingkurve nachzubilden: beginnend 1960 setzt man die Ausgangs-CO₂-Masse ein, berechnet QPkt und SPkt anhand der Formeln (2) und (1), kommt so mittels

der Grundgleichung zur Massenänderung $mPkt$ für das jeweilige Jahr und addiert diese dann auf die vorhandene Masse, um die Masse des Folgejahres zu bestimmen. Diese Rekonstruktion der Parabel mit unserem linear-quadratischen Ansatz für den Quellfluss gelingt hervorragend, siehe Abb. 3.

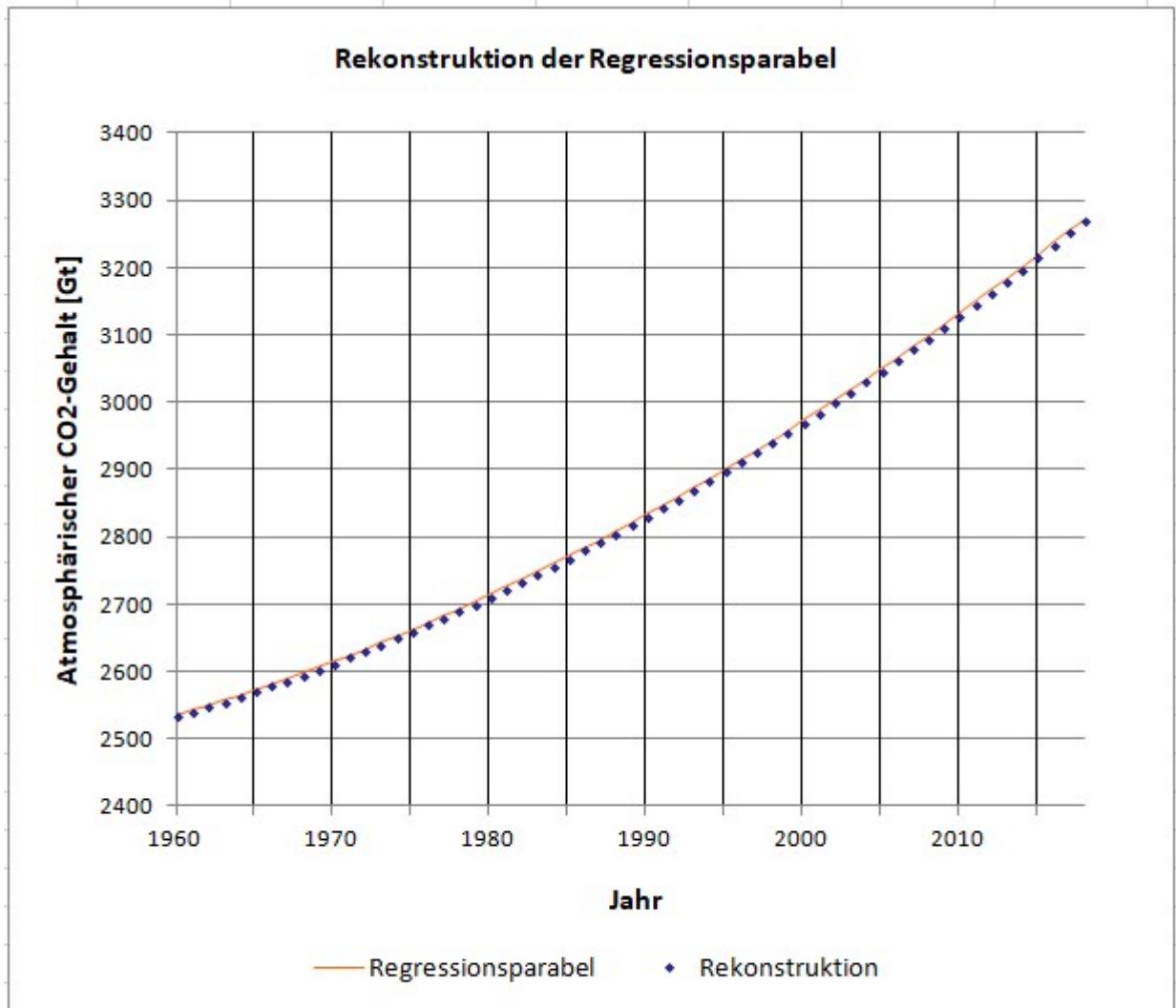


Abb. 3: CO2-Gehalt der Atmosphäre in Gt, dargestellt durch die Regressionsparabel und in der iterativen Rekonstruktion mittels der jährlichen Quell- und Senkenflüsse.

Der Zusatz-Quellfluß unbekannter Herkunft, der uns hier vorrangig interessiert, ergibt sich als Differenz $QPkt_x = QPkt - QPkt_z$. Er lässt sich für jedes Jahr berechnen. Ausgewählte Ergebnisse zeigt Tabelle 1.

Jahr	QPkt	QPktz	QPktx	QPktx/QPktz
1960	133,6	10,5	123,2	11,75
1965	136,5	12,6	123,9	9,84
1970	139,6	14,7	124,9	8,49
1975	142,9	16,8	126,1	7,50
1980	146,6	18,9	127,6	6,74
1985	150,4	21,0	129,4	6,15
1990	154,5	23,2	131,4	5,67
1995	158,9	25,3	133,6	5,29
2000	163,5	27,4	136,1	4,97
2005	168,3	29,5	138,8	4,71
2010	173,4	31,6	141,8	4,49
2015	178,8	33,7	145,1	4,30
2025	190,2	37,9	152,3	4,02
2092	292,9	66,2	226,7	3,42

- Tabelle 1: Gesamter (QPkt), zivilisatorischer (QPktz) und unbekannter (QPktx) jährlicher Quellzufluss an CO₂ in die Atmosphäre, in Gigatonnen pro Jahr (Gt/a).
- Letzte Spalte: Verhältnis des unbekannten zum zivilisatorischen Quellfluss.

Man erkennt, dass der unbekannte Quellzufluss vom Beginn des Auswertezeitraums an zunimmt (Spalte 4), in Relation zum zivilisatorischen Zufluss jedoch zunächst abnimmt (Spalte 5). Einfache Extrapolation der Rechnung ergibt für 2025 den Wert QPktx/QPktz = 4,0. Um das Jahr 2092 wird dann ein sehr flaches Minimum beim Wert 3,4 durchlaufen (siehe letzte Zeile). Eine so weite Extrapolation darf man allerdings nicht als Prognose verstehen!

Die entscheidende Erkenntnis aus Tabelle 1 lautet, dass der unbekannte Quellzufluss bis heute mindestens viermal größer war als der zivilisationsbedingte, im Schnitt über den Auswertezeitraum rund sechsmal größer. Menschliche Aktivität spielte demzufolge mit weniger als 15 % Anteil nur eine untergeordnete Rolle im beobachteten CO₂-Anstieg der Atmosphäre.

Zusammenfassung der Ergebnisse

- A) Der zeitliche Verlauf der atmosphärischen CO₂-Konzentration lässt sich im Auswertezeitraum 1960 – 2018 in hervorragender Näherung als Teil einer Parabel beschreiben.
- B) Dieser parabolische Verlauf verlangt im Modell diffusionsgetriebener Senkenflüsse prinzipiell auch einen parabolisch ansteigenden Quellzufluss. Der Ansatz erweist sich als zielführend, liefert selbst

jedoch keinen Aufschluß über den Wert der Abklingkonstanten, der den Senkenfluss bestimmt.

C) Legt man in diesem Ansatz die Abklingkonstante zu Grunde, die sich aus den Atomwaffentests des 20. Jahrhunderts ergibt, dann hatte der veröffentlichte anthropogene CO₂-Ausstoß zwischen 1960 und 2018 im Durchschnitt nur einen Anteil von weniger als 15 % am Anstieg des atmosphärischen CO₂-Gehalts.

Diskussion

An dieser Stelle erhebt sich die Frage nach dem Ursprung des unbekannten zusätzlichen Quellflusses QPktx. Dass er auf einem Fehler in der Angabe des menschlichen Eintrags QPktz beruht, ist in der erforderlichen Höhe kaum vorstellbar.

Eine natürliche Quelle dafür ist zunächst auch nicht erkennbar, zumal wenn man die These vertritt, dass die Atmosphäre ohne menschliches Zutun in einem immerwährenden Gleichgewicht beim Gehalt von 280 ppm ruht. Diese These ist allerdings fragwürdig. Sie lässt sich nicht auf fundamentale Gesetzmäßigkeiten zurückführen. Wenn sie in einem gewissen Zeitfenster zutreffend gewesen sein mag, bedeutet dies noch keine Festlegung für alle Zeiten. Mit Wegfall der Gleichgewichts-These verliert der Quellfluß QPktx seinen mysteriösen Charakter und ist einfach Bestandteil der natürlichen Dynamik, die noch weiter erforscht werden muss. Detailliertere und lesenswerte Ausführungen zu diesem Themenbereich finden sich in [8].

Fassen wir noch mögliche Fehler unserer Analyse ins Auge: ihr Resultat hängt entscheidend vom Wert der Abklingkonstanten alpha ab: wenn alpha niedriger wird, reduziert sich auch der Beitrag QPktx. Das wird den Zusatzbeitrag QPktx aber nicht beseitigen, sondern nur quantitativ modifizieren (s. Anhang).

U.U. wäre eine zeitliche Verminderung der Abklingkonstanten in Betracht zu ziehen, etwa weil die Senken an die Grenze ihrer Aufnahmefähigkeit kommen. Dies wird z.B. in [4] verneint. Dagegen spricht außerdem, dass die Abklingkurve des C-14 aus den Kernwaffentests im wesentlichen von der Aufnahmefähigkeit des tiefen Ozeans und der Biomasse bestimmt wird [8], wo keine Sättigung vorliegt.

Die Rolle möglichst gut zu klären, die der anthropogene CO₂-Ausstoß tatsächlich spielt, ist von großem Interesse, denn die von der Politik geforderten Maßnahmen zur CO₂-Reduktion und –vermeidung kosten hohe Milliardenbeträge. Sie lassen sich nur auf einer sicheren Wissensgrundlage rechtfertigen, ganz abgesehen davon, daß national beschränkter Parteien-Ehrgeiz ins Leere läuft, wenn es an internationaler Koordination der Maßnahmen fehlt.

Anhang: Die Bestimmung der Abklingkonstanten

Der Kehrwert der Abklingkonstanten hat die Bedeutung einer charakteristischen Zeit τ für das Abklingen des atmosphärischen CO₂-Pegels, wenn der Quellstrom versiegt (Abklingzeit). Man kann τ auch als die mittlere Verweilzeit eines CO₂-Eintrags in der Atmosphäre interpretieren, die wiederum mit der Halbwertszeit HWZ = $\tau * \ln 2$ verbunden ist. Aus der C-14-Abklingkurve in [11] (die auch in [8] wiedergegeben ist) lässt sich unmittelbar ableiten $\tau = 16$ Jahre, und mit der Korrektur von Störeinflüssen wird daraus der Wert 20 Jahre [8]. Daraus wiederum bestimmt sich der oben benutzte Wert $\alpha = 1 / \tau = 0,05 / \text{a}$.

Die Spannweite der möglichen α -Werte, die sich alle eignen, um die Keeling-Kurve zu rekonstruieren, ist allerdings sehr groß. In verschiedenen Veröffentlichungen (z.B. [4], [9], [10]) findet man für τ Angaben im Bereich 40 bis 60 Jahre, also α ca. 0,02 /a. Solche Werte kommen zustande, wenn man die Hypothese eines stabilen 280-ppm-Niveaus als naturgegeben voraussetzt und das Abklingen einer Störung auf dieses Niveau bezieht. Mit einem solch geringen α -Wert fällt auch der quadratische Quell-Parameter $U = \alpha * A$ nur gering ins Gewicht, so dass der Quellfluß sich stark dem linearen Verlauf der anthropogenen Quelle annähert. Daraus aber wie Eschenbach [10] den Schluß zu ziehen, am Anstieg der Keelingkurve wäre neben dem anthropogenen Quellfluß kein natürlicher Zusatzbeitrag beteiligt, ist unzulässig. Wie sich das Verhältnis des unbekannten zum zivilisatorischen Quellfluß mit α verändert, sei am Beispiel des Jahres 2015 demonstriert:

Alpha [1/a]	QPktx / QPktz
0,02	1,4
0,05	4,3
0,13	11,9

Tabelle 2: Auswirkung des α -Wertes auf das Verhältnis des unbekannten zum zivilisatorischen Quellfluss am Beispiel des Jahres 2015.

Selbst im extremen Fall $\alpha = 0,02 / \text{a}$ wird der zivilisatorische Quellenanteil noch vom unbekannten Zusatzanteil übertrroffen.

Im anderen Extrem setzt man das vorindustrielle 280-ppm-Niveau (also den atmosphärischen Gehalt $m_{nat} = 2245$ Gigatonnen) mit dem Fluss in Verbindung, der den Austausch zwischen Atmosphäre und ozeanischer Deckschicht beschreibt. Der beträgt nach [6] $Q_{PKtoz} = 293$ Gt/a (die Angaben zu Q_{PKtoz} variieren etwas, vgl. z.B. [6], [7]; Umrechnungsfaktor von Gt C auf Gt CO₂: 3,66). Aus diesem Szenario lässt sich herleiten: $\alpha = Q_{PKtoz} / m_{nat} = 0,13 /a$, und daraus folgt wiederum die Abklingzeit $\tau = 7,7$ Jahre. Es ist aber bekannt, dass neben diesem ‚schnellen‘ Zyklus auch langsamere Zyklen existieren, an denen der tiefe Ozean, die Biosphäre und das Gestein beteiligt sind [8]. Sie sind bei dekadischen Verläufen zweifellos zu berücksichtigen und kommen auch in der C-14-Kurve zum Tragen, die in dieser Arbeit zugrunde gelegt wurde.

Quellenverweise

[1]

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid>
Dort die Option ‚Diagramm als Excel mit Daten‘ anklicken.

[2] <https://de.wikipedia.org/wiki/Keeling-Kurve>

[3]

<https://www.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/>

[4] J. Dengler, J. Reid 2023: Emissions and CO₂ Concentration – An Evidence Based Approach, *Atmosphere* 2023, 14, 566
<https://doi.org/10.3390/atmos14030566>

[5] E. Roth 2023: Das schnelle Wachsen der CO₂-Konzentration, Ursachen und Folgen
<https://eike-klima-energie.eu/2023/06/06/das-schnelle-wachsen-der-co2-konzentration>

[6]

<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kohlenstoffkreislauf>

[7] <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffzyklus>

[8] E. Roth 2025: About the Origin of CO₂ in the Atmosphere, SCC-Publishing Vol. 5.1 prelim. pp. 1-14,
<https://doi.org/10.53234/scc202501/05>

[9] P. Dietze 2020: DEKARBONISIERUNG? Der fatale Irrtum durch falsche C-Modelle,
<https://www.fachinfo.eu/dietze2020.pdf>

[10] W. Eschenbach 2025: Über Emissionen und CO₂,

<https://eike-klima-energie.eu/2025/04/07/ueber-emissionen-und-co2/>

[11] <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernwaffen-Effekt>

Der Autor ist Diplomphysiker i.R. und war beruflich im medizinischen Strahlenschutz tätig. Er ist also kein Atmosphären- oder Klimawissenschaftler und hat deshalb keinen vollständigen Überblick über die einschlägige Fachliteratur. Zweifellos werden einige der aufgeworfenen Fragen dort behandelt. Soweit bekannt, wird der hier vorgestellte Lösungsansatz dort jedoch nicht verfolgt.

Dieser Beitrag ist v.a. als Denkanregung zu verstehen. Da es auch im Bereich der EIKE-Gemeinschaft Fachwissen gibt, sind sachdienliche Kommentare ausdrücklich willkommen.