

Ein einfaches Modell für die Vorhersage von CO₂ Konzentrationen in der Atmosphäre in Abhängigkeit von globalen CO₂ Emissionen

Michael Vollmer *, Wolfgang Eberhardt +

* FB Technik, TH Brandenburg, 14770 Brandenburg, + Institut für Optik und atomare Physik, TU Berlin
vollmer@th-brandenburg.de

Kurzfassung

Es wird das vielleicht einfachst mögliche Modell vorgestellt, mit dem zeitabhängige CO₂ Konzentrationen $c(t)$ in der Atmosphäre ausgehend von verschiedenen globalen Emissionsszenarien für CO₂ berechnet werden. Dazu wird eine einzelne inhomogene lineare Differenzialgleichung 1. Ordnung hergeleitet, deren Parameter sich aus den quantitativen Daten des global carbon project sowie Mauna Loa Daten für CO₂ Konzentrationen errechnen. Das Modell wird erstens getestet am Zeitraum 1960 bis 2020 mit vergleichsweise guter quantitativer Übereinstimmung zu Messdaten. Zweitens wird für zwei typische IPCC Emissions-Szenarien ein Vergleich der Modellvorhersagen mit denen der komplexen IPCC Earth-System-Klimamodelle diskutiert mit qualitativer Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs. Drittens werden Ergebnisse einiger ausgewählter neuer Emissionsszenarien präsentiert. Ungeachtet einiger Abweichungen zu komplexeren Klimamodellen zeichnet sich unser Modell durch zwei wichtige Vorteile für die Lehre aus. Zum einen ist es sehr einfach für Studierende und begabte Schüler nutzbar, da die erforderliche Lösung der Differentialgleichung bereits mit handelsüblicher Tabellenkalkulationssoftware wie z.B. Excel programmiert werden kann. Dadurch gestattet es zum anderen auch sehr einfach, den zeitlichen Verlauf von Emissionsszenarien zu verändern und innerhalb weniger Sekunden Veränderungen aufgrund geänderter Eingaben zu berechnen. Insofern eignet sich das Modell sehr gut als Einstieg in das Thema Klimamodellierung in einführenden Hochschulvorlesungen zum Themenbereich Kohlenstoffkreislauf und Klimawandel. In der Schule kann es gegen Ende der Sekundarstufe 2 beispielsweise im Projektunterricht zum Themenkomplex Nachhaltigkeit in Physik und/oder Mathematik eingesetzt werden.

1. Einleitung

Der Klimawandel mit all seinen Auswirkungen auf die Lebensbedingungen auf der Erde ist zur Zeit eines der wichtigsten, aber vor allem auch der komplexesten Phänomene unserer Welt. Generell werden sehr detaillierte Modelle benutzt, um aus den globalen anthropogenen Kohlendioxidemissionen die sich daraus ergebenden Treibhauskonzentration in der Atmosphäre zu berechnen.

Letztere dienen wiederum als Input für andere komplexe Modelle, die entsprechende Änderungen von Klimaparametern wie Temperatur, Niederschlagsmuster, Verschiebung von Klimazonen auf der Erde, Anstieg des Meeresspiegels und vieles mehr vorherzusagen. Ebenso können auch Extremwetterereignisse durch den Klimawandel wahrscheinlicher werden. Je komplexer die Modelle sind, desto schwieriger ist es für Nichtfachleute, alle Aspekte quantitativ zu verstehen, selbst für andere Wissenschaftler aus den Bereichen Physik, Chemie, Biologie, Mathematik usw.

Treibhauseffekt und Klimawandel mit allen damit zusammenhängenden physikalischen Prozessen sind natürlich auch in Fachzeitschriften für den Physikunterricht behandelt worden (z. B. [1-3]). Der globale

Kohlenstoffkreislauf auf der Erde mit der Modellierung der Kohlenstoffaufnahme durch den Ozean und die Biosphäre als Input für alle Klimamodelle ist dabei eines der komplexeren Themen. Neben vielen Forschungsarbeiten (z.B. [4-6]) und IPCC-Reviews ([7], Kap. 5 in [8]) zu diesem Thema wurden vereinfachte Modelle für die Kohlenstoffaufnahme von Ozean und Biosphäre auch in der Hochschullehre eingeführt (z.B. [9-12]). Sie behandeln den Kohlenstoffkreislauf in der Regel mit sogenannten box models. Darin werden die verschiedenen CO₂-Senken als Kästen behandelt, und Differentialgleichungen beschreiben den Austausch an den Grenzflächen zwischen den Kästen. Anspruchsvollere Modelle fügen vertikale Diffusions- und Konvektionsprozesse im Ozean hinzu. In den didaktischen Modellen wurden bis zu 7 Boxes eingeführt: Atmosphäre, Biosphäre, Boden, Ozeanoberfläche, mittlerer Ozean, tiefer Ozean und Ozeansedimente. Die Zahl der zur Beschreibung benötigten Differentialgleichungen und der darin enthaltenen Parameter wächst mit der Anzahl der Boxes, bei größerer Anzahl wird es schnell mathematisch komplex.

Außerdem ist bekannt, dass der Austausch zwischen verschiedenen Kohlenstoffreservoirien nur dann

durch lineare Modelle beschrieben werden kann, wenn der Kohlenstoff in jedem Reservoir gut vermischt ist. Deshalb muss der ozeanische CO₂-Austausch in verschiedenen Tiefenbereichen durch nichtlineare Gleichungen beschrieben werden [5].

Offensichtlich ist eine große Anzahl von Differentialgleichungen, einige darunter nichtlinear, mit entsprechender Zahl von Parametern ein Hindernis für die Vermittlung des Themas auf einführendem Niveau. Dementsprechend bieten diese Gleichungen kein wirklich tiefgehendes Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse.

Um hier Abhilfe zu schaffen möchten wir das vielleicht einfachst mögliche Box Modell vorstellen, ein lineares Zwei-Box-Modell. Eine Box ist die Atmosphäre, die andere beschreibt die kombinierte CO₂-Senke von Ozean und Land. Dieser einfache Ansatz ist näherungsweise gerechtfertigt, da der Austausch zwischen der obersten Ozeanschicht und der Tiefsee nur auf sehr langen Zeitskalen von mehreren hundert Jahren stattfindet [13].

Dieses Modell kann dazu beitragen, ein intuitives Verständnis des ersten Schritts des Klimawandels zu fördern, d. h. die Vorhersage der Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre. Es basiert auf sehr einfachen Argumenten des globalen Kohlenstoffkreislaufs und einer vernünftigen – durch Daten des Global Carbon Project [14] gestützten - Annahme, wie die globalen CO₂-Senken von den atmosphärischen CO₂-Konzentrationen abhängen.

Als Startparameter verwendet das Modell beispielsweise empirisch bekannte CO₂- Emissions- und Senken-Daten für das Jahr 2021 (siehe Abbildung 4 in [14]). Im Jahr 2021 haben die kombinierten Senken von Ozean und Land 6,4 Gt Kohlenstoff, d.h. 23,5 Gt CO₂ aufgenommen. In der Atmosphäre verblieben etwa 19 Gt, entsprechend 45 % der globalen Emissionen. In der Vergangenheit schwankte dieser Anteil α_{Atm} und er wird auch in Zukunft je nach Emissionen erheblich schwanken. Überraschenderweise war er jedoch in den letzten 60 Jahren nahezu konstant (siehe Abbildung 9 in [14]).

Das Modell stützt sich auf empirische Daten aus dem Zeitraum 1960 bis 2020, die zeigen, dass der jährlich gemittelte Anteil der globalen CO₂-Senken Ozean und Land zusammen in etwa linear von der atmosphärischen CO₂-Konzentration abhängt.

Diese Annahme führt zu einer einfachen Differentialgleichung, welche die Veränderung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre in Abhängigkeit von den zeitabhängigen globalen anthropogenen CO₂-Emissionen beschreibt. Das Modell liefert sofort eine natürliche Zeitskala für Veränderungen der atmosphärischen Konzentrationen. Es ermöglicht auch die Abschätzung erwarteter maximaler CO₂-Konzentrationen und deren Änderungen als Funktion der Zeit für eine Reihe von Emissionsszenarien.

Die wenigen Parameter des Modells werden aus den empirischen Daten der CO₂-Emissionen und Senken

des Zeitraums 1960 bis 2020 abgeleitet. Um trotz der extremen Vereinfachungen des Modells Vertrauen in die Ergebnisse zu gewinnen, vergleichen wir zunächst die Vorhersagen in Abhängigkeit von den bekannten Emissionen für den Eingabezeitraum 1960 bis 2020. Die Ergebnisse, die nur die Ausgangsbedingungen von 1960 und die Modellparameter verwenden, stimmen recht gut mit den Literaturdaten [15] überein.

Daher sind wir überzeugt, dass das Modell auch als sinnvoller Ausgangspunkt für die Analyse atmosphärischer CO₂-Konzentrationen für andere Emissionsszenarien dienen kann. Deshalb vergleichen wir die Modellergebnisse auch mit denen von zwei aktuellen IPCC-Szenarien. Wir diskutieren Einschränkungen und mögliche Probleme, aber auch Vorteile des Modells. Für die Vermittlung des Themas in der Lehre ist das Modell besonders hilfreich, um einen schnellen, intuitiven Einblick in die Veränderungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration in Abhängigkeit von weiteren Emissionsszenarien zu geben. Aufgrund seiner mathematischen Einfachheit eignet es sich besonders für den einführenden Unterricht zu den Grundlagen des Klimawandels. Lernende können die Gleichung bereits mit einem einfachen Tabellenkalkulationsprogramm wie Excel lösen.

2. Das Modell

Im Mittel herrscht auf der Erde ein globales Gleichgewicht zwischen Quellen und Senken von CO₂ (s. Abbildung 4e, [14]). Die wichtigsten Quellen sind Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe sowie Emissionen aus Landnutzungsänderungen, insbesondere das Brandrodren von Wäldern. Die Senken sind neben der Aufnahme durch die Atmosphäre das Binden von CO₂ durch die Vegetation an Land und die Aufnahme durch die Ozeane aufgrund von direkter Absorption, Karbonatbildung und Algenwachstum.

Neue Studien, als Global Carbon Project bezeichnet, fassen die Ergebnisse für das globale Kohlenstoffbudget von 1850 bis 2021 mit einer Projektion für 2022 [14] zusammen. Darin zeigt sich, wie die globalen anthropogenen CO₂-Emissionen Q_{tot} innerhalb der letzten sechs Jahrzehnte durch Deposition in den Ozeanen, an Land sowie in der Atmosphäre verteilt wurden.

Aus den Daten des globalen Kohlenstoffkreislaufs (siehe Abbildung 9 in [14]) lässt sich ablesen, dass die Deposition von CO₂ in der Atmosphäre von 1960 bis 2020 einen überraschend konstanten Anteil von $\alpha_{\text{atm}} \approx 0,45$ an den Gesamtemissionen ausmachte (der Einfachheit halber vernachlässigen wir die 1% des nicht bilanzierten Kohlenstoffbudgets). Gemeinsam mit dem Anstieg des atmosphärischen CO₂ ist die Aufnahmekapazität der Senken in den Ozeanen und an Land ungefähr linear gewachsen. Die Senken nehmen derzeit etwas mehr als die Hälfte (den Anteil $(1-\alpha)$, d. h. 55 %) aller Emissionen auf.

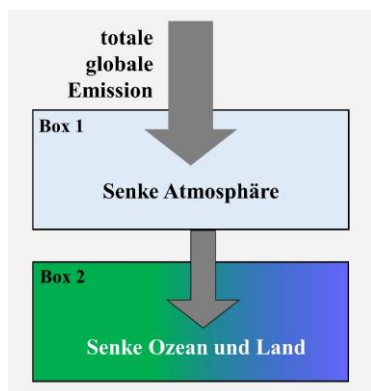


Abb. 1: Schematische Darstellung des Modells. Die totale globale Emission wird in die Atmosphäre eingetragen. Die kombinierten Senken Ozean und Land entnehmen CO₂ proportional zum Partialdruck in der Atmosphäre.

In unserem Modell gehen wir im Allgemeinen aber nicht davon aus, dass dieser Anteil α_{atm} eine Konstante ist, sondern dass er sich mit der Zeit ändern kann. Eine schematische Darstellung des Modells ist in Abbildung 1 zu sehen.

2.1. Eingangsdaten und Annahmen

Um abzuschätzen, wie die totale globale Emission Q_{tot} in die Atmosphäre zu einer Veränderung der atmosphärischen CO₂-Konzentration führt, verwenden wir den folgenden Ansatz:

Die globale Gesamtemission ist $Q_{tot} = Q_{LN\ddot{A}} + Q_{fossil}$, wobei der fossile Beitrag Q_{fossil} gegenwärtig viel größer ist als $Q_{LN\ddot{A}}$ von LandNutzungsänderungen. Für das Jahr 2021 beläuft sich Q_{fossil} auf 37,0 Gt CO₂ (37 Gt pro Jahr = 37Gt/a) und der zusätzliche Beitrag von $Q_{LN\ddot{A}} \approx 4$ GT CO₂/a führt zu einem Gesamtbetrag von etwa 41 Gt CO₂/a [14].

Die Deposition in Senken ist $S_{tot} = S_{Ozean} + S_{Land} + S_{atm}$ und im Gleichgewicht gilt $Q_{tot} = S_{tot}$. Daraus folgt

$$S_{atm} = (Q_{tot} - (S_{Ozean} + S_{Land})) \quad (1)$$

Jede Aufnahme von CO₂ in die Atmosphäre führt natürlich zu einer Änderung der atmosphärischen Konzentration. Dafür setzen wir an

$$\frac{dc}{dt}(t) = \beta S_{atm} = \beta(Q_{tot} - (S_{ocean} + S_{land})) \quad (2)$$

wobei die Konstante β (in ppm/Gt) die Umrechnung des jährlichen Eintrags von CO₂ (in Gt/a) zur daraus resultierenden jährlichen Veränderung der atmosphärischen Konzentration (in ppm/a) beschreibt.

Im Zeitraum 1960 bis 2021 können aufgrund der Datenlage (Abbildung 2) die Senken von Ozean, Land und Atmosphäre angenähert werden als

$$S_{atm} = \alpha_{atm} \cdot Q_{tot} \approx 0,45 \cdot Q_{tot} \quad (3a)$$

und

$$S_{Ozean} + S_{land} = (1 - \alpha_{atm}) \cdot Q_{tot} \quad (3b).$$

Die Senkenleistung stieg in diesem Zeitraum in etwa proportional zu den Gesamtemissionen. Deshalb

machten die Senken von Land und Ozean kombiniert in diesen 6 Dekaden etwa konstante Anteile der Gesamtemissionen aus, insgesamt etwa 55%.

Deshalb beschreiben wir neben der Atmosphäre als erster Box, Ozean und Land zusammen als eine zweite Box. Aufgrund der Nord-Süd-Asymmetrie der Landmassen auf der Erde führt die Vegetationsaufnahme zu einer periodischen jährlichen Zeitabhängigkeit, die sich im bekannten Sägezahnprofil der globalen CO₂-Daten [15] zeigt, mit Schwankungen von etwa $\pm 2,5$ ppm um 1960 bis etwa $\pm 3,5$ ppm um 2020. Da wir nur langfristige Veränderungen modellieren wollen, diskutieren wir nur Jahresmittelwerte, d. h. wir gehen nicht weiter auf saisonale Schwankungen ein.

Die Deposition von CO₂ im Ozean und in der Biosphäre erfolgt über den Zwischenschritt der ursprünglichen Ablagerung in der Atmosphäre. Der Transport von CO₂ aus der Luft in das Wasser des Ozeans oder die Vegetation erfolgt über die jeweiligen Grenzflächen. Es ist plausibel, dass die Ablagerung von der Anzahl der CO₂-Moleküle, die auf diese Grenzfläche treffen abhängt, d.h. von der CO₂-Konzentration c_{atm} . Für dieses einfachste Modell nehmen wir an, dass die Deposition linear von c_{atm} abhängt. Natürlich können Ozean und Biosphäre verschiedene Proportionalitätskonstanten haben. Der Einfachheit halber und um den Nutzen dieser grundlegenden Modellannahme zu verdeutlichen, verwenden wir aber nur eine einzige Proportionalitätskonstante für die kombinierte CO₂-Aufnahme durch Ozean und Land, da sie ja als eine gemeinsame Box angesehen werden. Quantitativ setzen wir deshalb für die gesamte zeitabhängige CO₂-Ablagerung in Ozean und Biosphäre folgende lineare Beziehung an:

$$(S_{Ozean} + S_{Land}) = k \cdot c(t) + b \quad (4).$$

Im weiteren Verlauf werden wir in Abbildung 3 zeigen, dass diese Modellannahme durch die bekannten globalen Kohlenstoffdaten der letzten 60 Jahre gut gerechtfertigt ist. Unter Verwendung von Gl. 4 kann Gl. 2 wie folgt umgeschrieben werden

$$\frac{dc}{dt}(t) = \beta(Q_{tot} - k \cdot c(t) - b) \quad (5a).$$

Dies führt letztlich auf eine inhomogene Differentialgleichung 1. Ordnung

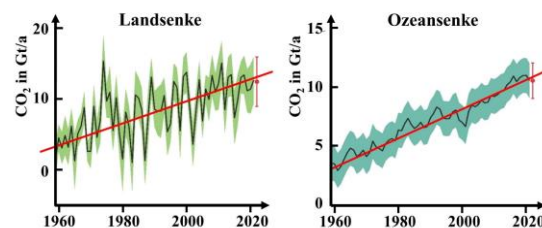


Abb. 2: Beträge der CO₂ Senken von Land (29%) und Ozean (26%) im Zeitraum 1960 bis 2020 [14]

$$\frac{dc}{dt}(t) + \beta \cdot k c(t) = \beta(Q_{tot}(t) - b) \quad (5b).$$

Die gesamte folgende Modellierung und ihre Diskussion gründet sich auf Gl. 5 mit den drei Parametern β , k und b sowie die für jedes Szenario definierten Eingangsdaten der globalen CO₂ Emissionen Q_{tot} .

2.2. Modellparameter aus bekannten Daten

Vor der Lösung der Differentialgleichung (Gl.5b) für verschiedene Emissionsszenarien $Q_{tot}(t)$, diskutieren wir die Modellparameter β , k und b . Sie können aus bekannten oder geschätzten Größen des Erdsystems abgeleitet werden, und zwar

- den globalen Kohlenstoff- oder CO₂-Emissionen pro Jahr: Schätzungen liegen bei $Q_{tot,2021} = 41$ Gt im Jahr 2021 [14]. Die IPCC-Modellprojektionen mit denen wir unser Modell später vergleichen, liegen mit $Q_{tot} \approx 40$ Gt/a um 2020 in der Nähe [8].
- den globalen atmosphärischen Mauna Loa CO₂-Konzentrationen von 1960 bis 2022 [15]. 2021 betrug der Jahresmittelwert $c_{atm,2021} = 416,4$ ppm.
- der aktuellen Wachstumsrate der jahresgemittelten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre: Im Jahr 2021 beträgt sie $dc/dt(t) \approx 2,37$ ppm/a [15].

Aus den Gleichungen 2 und 3 für das Jahr 2021 ergibt sich daher $2,37$ ppm/a = $\beta \cdot \alpha_{2021} \cdot 41$ Gt/a, was bei $\alpha_{2021} = 0,45$ den Wert $\beta = 0,128$ ppm/Gt ergibt. Im Folgenden nehmen wir diesen konstanten β -Wert für unser Modell im Emissionsbereich oberhalb von etwa 20 Gt/a an. Dieses entspricht in etwa den Emissionen im Jahre 1960, also dem Beginn des Zeitraums für den wir das Modell betrachten. Der Kehrwert $1/\beta \approx 7,8$ Gt/ppm entspricht der globalen CO₂-Deposition in Gt in die Atmosphäre, welche zu einem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration um 1 ppm führt.

Die anderen Konstanten k und b ergeben sich aus empirischen Daten der Senken und Fit-Verfahren unter Verwendung von Gl. 4. Insbesondere haben wir die Daten für die dekadisch gemittelte jährliche CO₂-Aufnahme durch Land und Ozeane als Funktion der Zeit aus Tabelle 6 von [14] verwendet. Die Zeitskala wurde mit Hilfe der Keeling-Kurve der Mauna Loa-Daten [15] in eine atmosphärische CO₂-Konzentrationskala übertragen. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt, welche die jährliche CO₂-Aufnahme im Ozean und an Land als Funktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration zwischen 1960 und 2020 zeigt.

Die lineare Anpassung der Daten (mit $R^2 = 0,916$) zeigt eine recht gute lineare Abhängigkeit). Daraus ergeben sich die Parameter k und b , die in allen folgenden Simulationen verwendet werden. Das Produkt $\beta k = 0,0196/a$ ist unabhängig von dem angenommenen Q_{tot} . Der inverse Wert definiert die Zeitkonstante des Modells

$$\tau = \frac{1}{\beta k} = 51 a \quad (6).$$

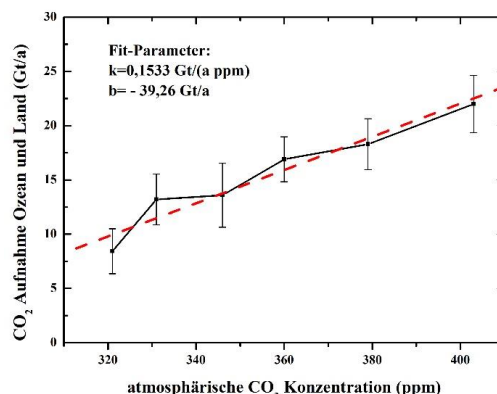


Abb. 3: 10-Jahresmittel der jährlichen CO₂ Aufnahme von Land und Ozean als Funktion der atmosphärischen CO₂ Konzentration im Zeitraum 1960 bis 2022. Die Senkendenaten stammen von [14], die Umrechnung der Zeitskala in c_{atm} erfolgte über die Mauna Loa Datenreihe [15]. Die gestrichelte Linie stellt eine lineare Anpassung an die Daten mit Unsicherheiten dar.

Diese Zeitkonstante beschreibt die Reaktionszeit des Systems auf jegliche Veränderungen. Sie spiegelt nicht die Verweilzeit des CO₂ in der Atmosphäre wider, die aufgrund der großen Flüsse zwischen den verschiedenen Reservoirs wesentlich kürzer ist. Tab. 1 fasst alle Modellparameter zusammen.

Tab. 1: Modellparameter und Eingangsdaten für die Simulationen

$Q_{tot, 2021}$ ≈ 41 Gt/a	$c_{Atm,2021}$ $\approx 416,4$ ppm	$\frac{dc}{dt}$ (2021) $\approx 2,37$ ppm/y
$\alpha_{2021} = 0,45$	$k = (0,1533 \pm 0,0205)$ Gt/(a·ppm)	
$\beta = 0,128$ ppm/Gt	$b = (-39,26 \pm 7,29)$ Gt/a	

2.3. Gültigkeitsbereich des Modells und Zeitabhängigkeit des Parameters α

Erstens stellen wir fest, dass die Fitkurve in Abbildung 3 Abweichungen von den gemessenen Werten anzeigt. Dies ist teilweise auf die recht großen Fehlerbalken der verfügbaren globalen Senken-Daten zurückzuführen. Für $c_{2021} = 416,4$ ppm würde Gl. 5 so zu einer Aufnahme durch Ozean und Land von etwa 24,6 Gt/a führen, was bei 41 Gt/y Emissionen eine Aufnahme von 60 % und nicht die erwarteten 55 % bedeuten würde. Wir erwarten also tatsächlich Abweichungen in der Größenordnung von 5-10 % für die Aufnahme an Land und im Meer, wenn wir das Modell mit Emissionsszenarien vergleichen. Dem ungeachtet sollten die Trends einige Erkenntnisse liefern.

Zweitens haben wir die Modellparameter k und b als konstant angenommen. Es ist offensichtlich, dass diese empirisch gestützte Annahme nur ab den 1960er Jahren, nachdem die große Beschleunigung einsetzte, einigermaßen gut funktioniert. Das heißt, dass unsere Modellergebnisse nur für Konzentrationen oberhalb von 315 ppm, für die nach Abbildung 3 die lineare

Beziehung von Gl. 4 für die Senken gegenüber der Konzentration gilt, sinnvoll sind. Diese Beschränkung ergibt sich rein rechnerisch auch schon aus der Tatsache, dass die gesamten Ozean- und Landsenken für Konzentrationen unterhalb von etwa 255 ppm negativ werden würden. Es ist zwar physikalisch nicht auszuschließen, dass die Senken bei stark abfallenden atmosphärischen CO₂ Konzentrationen auch wieder zu Quellen werden, aber unser Modell hier ist viel zu einfach, um diesen Punkt zu bestimmen.

Für den Zeitraum von 1960 bis 2020 wurde festgestellt, dass der Anteil α der Aufnahme von CO₂ durch die Atmosphäre ungefähr konstant ist. Vor etwa 1950 sind die Daten zu Emissionen und Senken jedoch viel kleiner, schwankend und unsicherer (siehe Abbildung 3 in [14]). Dies wird in unserem einfachen Modell nicht beschrieben.

Wir wissen, dass die CO₂-Konzentration in der vorindustriellen Zeit vor 1850 relativ stabil um 280 ppm lag. Gehen wir sinnvollerweise davon aus, dass es auch damals einige natürliche Emissionen gab, muss der Anteil der atmosphärischen Aufnahme α gleich Null gewesen sein und alle Emissionen wurden letztlich durch Ozean und Land aufgenommen. Im Modell bedeutet dies, dass der Fitparameter k vor 1850 den Wert Null hatte. Fazit: nicht nur α sondern auch k und b müssen sich als Funktion der Zeit zwischen 1750 und 1960 geändert haben.

In unserem einfachen Modell wollen wir derartige Komplikationen vermeiden. Daher beschränken wir alle Simulationen auf Emissionsmengen, die für Daten nach 1960 gelten, d. h. auf CO₂-Gesamtemissionen von über etwa 16 Gt/Jahr. Infolgedessen enden alle unsere Simulationsszenarien mit Rückgängen der totalen Emissionen in der Regel bei etwa 50 % der derzeitigen Emissionen, d. h. bei etwa 20 Gt/a.

Drittens muss α auch in der Zukunft zeitabhängig sein. Kehren wir zu den empirischen Daten aus Abbildung 3 zurück, wonach der Anteil der CO₂-Aufnahme durch Ozean und Land proportional zur atmosphärischen CO₂-Konzentration ist. Wenn dies zutrifft, hängt der Wert von α automatisch von dem gewählten Emissionsszenario ab.

Nehmen wir zum Beispiel fiktiv an, die globalen Emissionen blieben konstant. Der entsprechende Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration würde zu einem Anstieg der Aufnahme durch Ozean und Land führen (Gl. 4). Bei konstanten Emissionen muss entsprechend der Anteil der atmosphärischen Aufnahme α abnehmen. Bei einem steileren Anstieg der Emissionen könnte α sogar konstant sein oder zunehmen. Diese Beispiele zeigen, dass der Anteil α der atmosphärischen CO₂-Aufnahme durch globale Emissionen in der Tat je nach Emissionsszenario von der Zeit abhängen wird. Bei allen Szenarien mit konstanten oder rückläufigen Emissionen muss α abnehmen. Ein solches Verhalten der sich ändernden atmosphärischen Aufnahme und Senkenleistung wird auch für viel anspruchsvollere Erdsystemmodelle erwartet,

wie im jüngsten IPCC-Bericht zusammengefasst. Auch in diesen Fällen wird die atmosphärische CO₂-Konzentration letztlich nach einem Maximum wieder abnehmen (siehe Beispiele unten).

2.4. Modellieren mit zeitabhängigen Emissionen

Normalerweise hängen die globalen Emissionen $Q_{tot}(t)$ in Gl. 5b von der Zeit ab. Wann immer wir ein Szenario für $Q_{tot}(t)$ haben, können wir Gl. 5b numerisch lösen, um $c(t)$ zu finden. Um saisonale Effekte auszuschalten, verwenden wir Zeitschritte von $\Delta t=1$ Jahr. Ausgangspunkt ist die Berechnung von $\frac{dc}{dt}(t)$. Offensichtlich ist

$$c(t + \Delta t) = c(t) + \frac{dc}{dt}(t) \cdot \Delta t \quad (7)$$

Mit Gl. 5b und Gl. 7 können wir jedes beliebige Emissionsszenario modellieren.

Aufgrund der Einfachheit des Modells kann es sogar von Studierenden oder begabten Schüler*innen gelöst werden, z. B. mit einem programmierbaren Tabellenkalkulationsprogramm wie Excel. Tabelle 2 zeigt einen Ausschnitt aus einer mögliche Excel-Datei. Die erste Spalte gibt das Jahr an, die zweite ist der Input der Szenarien in Form der gesamten zeitabhängigen globalen Emissionen $Q_{tot}(t)$. Die 3. und 4. Spalte berechnen daraus $\beta \cdot (Q_{tot}(t) - b)$ und $\beta \cdot k \cdot c(t)$, deren Differenz, die Konzentrationsänderung pro Zeitintervall, in der fünften Spalte gezeigt ist. Alternativ kann die 5. Spalte auch direkt berechnet werden. Die sechste Spalte gibt schließlich die Konzentration an, wobei die erste Zeile die vorgegebene Startkonzentration des jeweiligen Startjahres ist. Zum Beispiel ist 316 ppm der Start am 31.12.1959 und 317 ppm die Konzentration am Ende des Folgejahres.

Tab 2: Beispiel einer möglichen Exceltabelle zur Berechnung der atmosphärischen CO₂-Konzentration bei gegebenen Modellparametern. Input ist die zeitabhängige totale globale Emission in Spalte 2. Sie bestimmt die dc/dt in Spalte 5 und daraus die neue Konzentration am Ende des Jahres (Spalte 6)

1: t Jahr	2: Q _{tot} Gt/a	3: $\beta(Q_{tot}-b)$ ppm/a	4: $\beta k c(t)$ ppm/a	5: 3- 4 dc/dt(t) ppm/a	6: c(t+Δt) ppm
					316.0
1960	17	7.20..	6.19..	1.007..	317.0..
1961	17.39..	7.25..	6.21..	1.038..	318.0..
1962	17.78..	7.30..	6.23..	1.068..	319.1..
...

3. Ergebnisse

3.1. Konstante Emissionen

Die einfachste Lösung von Gl. 5b ergibt sich für konstante Emission Q_{tot} . In diesem Fall besteht die Lösung der inhomogenen Gleichung aus der Summe der Lösung der homogenen Gleichung und einer speziellen Lösung der inhomogenen Gleichung. Wir beginnen mit dem (unrealistischen) Fall, dass es für die nächsten Jahrhunderte eine konstante globale Emission gibt, die gleich der Emission von 2021 ist, d.h.

$Q_{\text{tot}}(t)=41 \text{ Gt/a}$. Die spezielle Lösung wird für $t \rightarrow \infty$ gefunden, wenn $dc/dt = 0$. In diesem Fall ist

$$c_{\infty} = \frac{(Q_{\text{tot}}-b)}{k} \quad (8a).$$

Der Gleichgewichtswert aus $Q_{\text{tot}}=41 \text{ Gt/a}$, b und k ist $c_{\infty} \approx 524 \text{ ppm}$. Bei dieser Konzentration ist die atmosphärische CO_2 -Aufnahme gleich Null, d. h. wir erwarten eine starke Abnahme von α mit der Zeit.

In ähnlicher Weise liefert Gl. 8a das Ergebnis für die CO_2 -Gleichgewichtskonzentration bei $t \rightarrow \infty$ für jede Situation, in der sich $Q_{\text{tot}}(t)$ schließlich einem konstanten Wert nähert. Bei $Q_{\text{tot}}=20 \text{ Gt/a}$, d. h. $\approx 50 \%$ der derzeitigen Emissionen, würde die Erde bei 387 ppm landen, d. h. bei Konzentrationen, die wir in den 1980er Jahren hatten.

Die Lösung der inhomogenen Gleichung ist einfach eine abfallende Exponentialfunktion

$$c(t) = c_0 e^{-\beta kt} = c_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8b)$$

mit der Zeitkonstante $\tau=1/(\beta k) \approx 51 \text{ a}$, d.h. die Veränderung der atmosphärischen Konzentrationen wird durch eine Zeitkonstante von etwa 50 Jahren bestimmt. Unter der Randbedingung, dass $c(t=0)=c_{2021}$ ist, ergibt sich für die Lösung von Gl. 5b bei konstantem Q_{tot}

$$c(t) = (c_{2021} - c_{\infty}) e^{-\beta kt} + c_{\infty} \quad (8c).$$

Abbildung 4a zeigt den Verlauf der atmosphärischen CO_2 -Konzentration dieser analytischen Lösung als Funktion der Zeit. Etwa 95 % der Konzentrationsdifferenz ($c_{2021} - c_{\infty}$) werden nach drei Zeitkonstanten, d. h. um 2170, erreicht. Abbildung 4b zeigt erwartete Gleichgewichtswerte als Funktion der jeweils konstanten Emissionsrate Q_{tot} . Würde die Welt ihre derzeitigen Emissionen auf 82 Gt/a verdoppeln und diese dann lange Zeit konstant halten, ergäbe sich eine CO_2 -Gleichgewichtskonzentration um 790 ppm.

Natürlich ist die Annahme einer konstanten Emission für Jahrhunderte auf dem gegenwärtigen Niveau völlig unrealistisch. Abbildung 4 soll nur die einfachste, und rein akademische, mathematische Lösung des Modells zeigen. Wenn überhaupt, kann sie als qualitative Vorhersage dessen dienen, was bis zum Jahr 2100 passieren könnte, wenn die jetzigen oder ähnliche Emissionen in diesem Jahrhundert beibehalten werden und die Aufnahme durch Ozean und Land weiterhin linear mit der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zunimmt.

Generell zeigt Abbildung 4 zudem ein sehr wichtiges Ergebnis, das prinzipiell auch andere Modelle liefern. Nach unserem heutigen Wissen über den Kohlenstoffkreislauf, das sich in mehr als 60 Jahren angesammelt hat [14], sollte jedes Szenario mit konstanten Emissionen irgendwann zu einer stabilen, konstanten CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre führen. Zwar war solch eine ideale stabile Konfiguration in der Natur auch in der vorindustriellen Zeit über viele

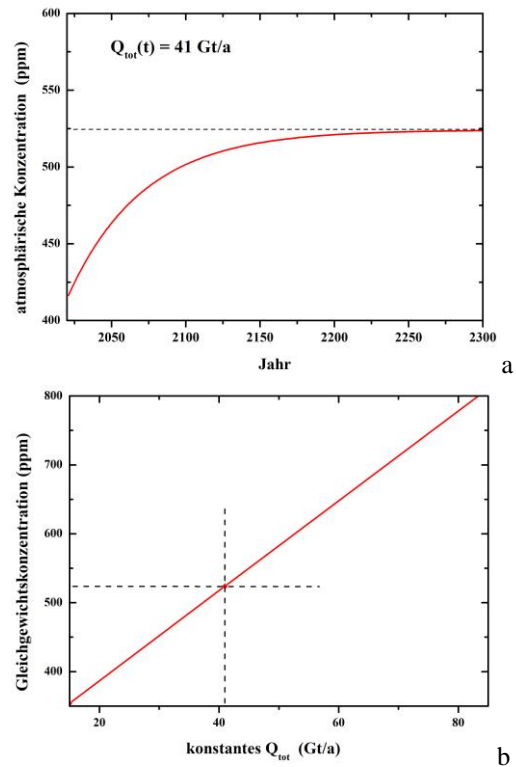


Abb. 4: a) Atmosphärische CO_2 -Konzentrationen für konstante globale Emissionen von 41 Gt/a. Es stellt sich ein Gleichgewichtswert von etwa 524 ppm ein. b) Änderung der Gleichgewichtskonzentration bei jeweils konstanter globaler Emission. Die Emissionsdaten von 2021 sind durch die vertikale gestrichelte Linie angedeutet, die sich ergebende Gleichgewichtskonzentration durch die horizontalen gestrichelten Linien.

Jahrtausende nicht vollständig gegeben, die Variationen in den 2000 Jahren vor 1850 lagen aber in einem relativ engen Bereich von 275 ppm bis 285 ppm. Auch in den 800 000 davor liegenden Jahren gab es auf Zeitskalen weniger Tausend Jahre immer recht stabile Gleichgewichte, deren Konzentrationen jedoch wegen der Eiszeiten auf längeren Zeitskalen von 10 000 bis 100 000 Jahren Schwankungen zwischen 190 und 290 ppm unterworfen waren. Zwischenfazit des Modells: immer wenn wir konstante Mengen an CO_2 emittieren, wird die atmosphärische CO_2 -Konzentration ein neues Gleichgewicht erreichen und nicht unbegrenzt ansteigen.

3.2. 1960 bis 2022: Modell und Messdaten

Um zu sehen, wie gut unser Modell auf etwas realistischere Emissionsszenarien anwendbar ist, vergleichen wir zunächst die Modellvorhersage für den Zeitraum 1960 bis 2020 mit den aufgezeichneten Mauna Loa-Messungen der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen (Abbildung 5) (die Differenzen der globalen zu den lokalen Mauna Loa Daten sind gering [15]).

Das Modell verwendete Q_{tot} -Werte, die linear von 17 auf 41 Gt/a steigen (blau). Ausgangspunkt war der 31.12. 1959 mit 316 ppm. Der Zeitraum bis 2021

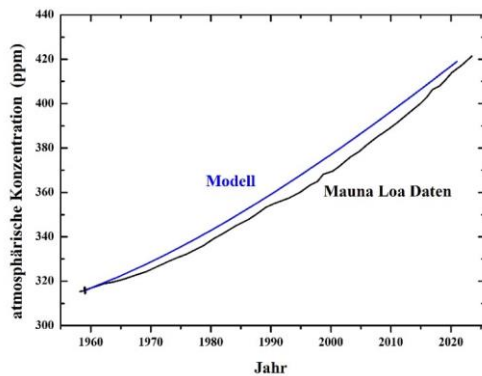


Abb. 5: Vergleich der Mauna Loa-Daten der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen (untere Linie) mit den Modellergebnissen (obere Linie). Das Modell beginnt mit 316 ppm im Jahr 1960. Die Gesamtemissionen Q_{tot} steigen im Modell linear von 17 Gt/Jahr (1960) auf 41 Gt/Jahr (2021).

wurde dann anhand des Modells berechnet. In Anbetracht der Einfachheit des Modells ist die quantitative Übereinstimmung mit den gemessenen Daten recht gut. Das war erwartbar, da die Modellparameter auch aus diesem Datensatz stammen. Der Trend ist jedenfalls eindeutig und die Abweichungen betragen nur wenige ppm. Dies ermutigt uns, das Modell auch auf zukünftige Emissionsszenarien anzuwenden.

3.3. Vergleich zu IPCC Szenarien

Der jüngste IPCC-Bericht aus dem Jahr 2021 diskutiert eine Reihe von Szenarien für die globalen Kohlendioxidemissionen, die bei etwa 40 Gt/Jahr im Jahr 2020 starten. Da die Veröffentlichung eines Berichts viel Zeit in Anspruch nimmt, vermuten wir, dass die vorgestellten IPCC-Modelle aus dem Jahr 2015 stammen. Wir vergleichen unsere Modellergebnisse mit zwei dieser Szenarien, dem SSP1-2.6 und dem SSP2-4.5-Szenario (kurz als 126 und 245 bezeichnet). Der Vergleich mit den anderen Szenarien ist ähnlich (siehe Abbildung 5.25a,b,c in [8]).

Von 2015 bis 2085 wurden die globalen Emissionen aus den IPCC-Szenarien verwendet (siehe auch unten). Da unser Modell nur für Emissionen sinnvoll ist, die größer sind als die um 1960, haben wir jedoch keine Emissionswerte unter 20 Gt/Jahr verwendet. Deshalb haben wir ab etwa 2085 konstante Werte von 20 Gt/a angesetzt. Da das IPCC-Szenario im Jahr 2015 begann, haben wir eine entsprechende Startkonzentration von 402 ppm verwendet.

Unser Modell zeigt die gleichen Trends wie die IPCC-Vorhersagen, liefert aber niedrigere Werte für die Konzentrationen (siehe Abbildung 6). Die maximalen Konzentrationen aus unserem Modell treten 2040 (für 126) und 2073 (für 245) auf, d. h. etwa 25 Jahre früher als die IPCC-Ergebnisse, und sie sind im Vergleich zu den IPCC-Vorhersagen um etwa 40 ppm (126) und mehr als 100 ppm (245) niedriger. Diese recht großen Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass unser Modell erheblich von den Annahmen des IPCC bezüglich der kombinierten Aufnahme

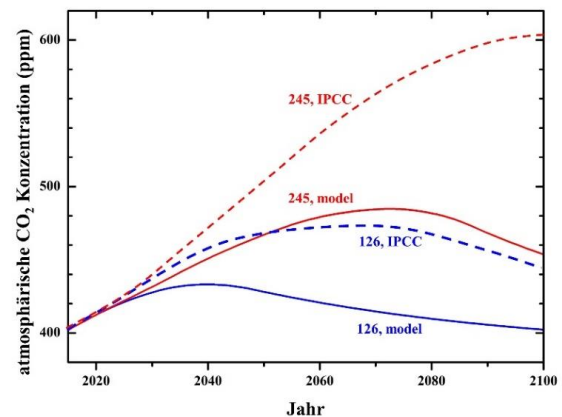


Abb. 6: Vergleich der atmosphärischen CO₂ Konzentrationen unsers Modells mit denen der IPCC Szenarien 126 und 245. Die zwei letzten Ziffern entsprechen dem, den angenommenen Emissionen äquivalenten, zusätzlichen Strahlungsantrieb (radiative forcing), hier also 2.6 W/m² und 4.5 W/m².

aus Meer und Land abweicht. Wir diskutieren zunächst die generelle Kurvenform.

In unserem Modell führt jede zeitabhängige Emission, die jetzt bei 40 Gt/Jahr beginnt und anschließend langsam abnimmt, zunächst immer zu einem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration c_{atm} . Denn zur Zeit liegt die kombinierte CO₂-Aufnahme von Ozean und Land bei etwa 22 Gt CO₂/Jahr und der verbleibende Teil verbleibt in der Atmosphäre. Die höhere atmosphärische Konzentration c_{atm} führt jedoch nach Gl. 4 zu einem Anstieg der CO₂-Aufnahme durch Ozean und Land, vorausgesetzt, der über 60 Jahre beobachtete lineare Trend hält an.

Der Anteil der Aufnahme durch Ozean und Land wird daher zunehmen und den Anstieg in der Atmosphäre verlangsamen. Bei abnehmender Emission Q_{tot} muss es irgendwann eine maximale Konzentration c_{atm} geben, bei der die kombinierte Aufnahme durch Meer und Land genau dem Emissionseintrag entspricht. Im Maximum beträgt die Aufnahme durch Land und Ozean dann dem Bruchteil 100 % und $\alpha_{\text{atm}}=0$.

Bei weiter sinkenden Emissionen können Ozean und Land dann mehr CO₂ aufnehmen als emittiert wird. Infolgedessen kann CO₂ aus der Atmosphäre in die Senken verlagert werden, und die atmosphärische Konzentration nimmt ab.

Dieses generelle Verhalten ist bekannt und wurde z. B. auch in [16] beschrieben: Das atmosphärische CO₂ wird abnehmen, sobald die anthropogenen Nettoemissionen (Emissionen minus Senken aus negativen Emissionstechnologien) kleiner werden als die jährliche Aufnahme durch die natürlichen Senken. Insofern war natürlich die allgemeine Kurvenform unserer Modellergebnisse sowie die der IPCC-Szenarien erwartet. Die quantitativen Unterschiede zwischen beiden liegen in den Annahmen unseres Modells im Vergleich zu den IPCC-Szenarien. Insbesondere nehmen

die IPCC Szenarien unterschiedliche Zeitabhängigkeiten von $\alpha(t)$ bzw. der Senkenleistung von Ozean und Land an.

Die genauen Annahmen des IPCC-Modells sind im neuesten IPCC-Bericht nicht explizit erwähnt, können aber aus Abbildung 5.25 von [8] abgeleitet werden. Dort sind Vorhersagen für Senken-Daten von Ozean und Land dargestellt - allerdings mit recht großen Unsicherheitsbalken, insbesondere für die Land-Daten.

Abbildung 7a,b zeigt einen entsprechenden Vergleich der kombinierten Ozean- und Landsenke in unserem Modell und den IPCC-Modellen. Die IPCC-Modelle gehen von viel geringeren Senken im Ozean und in der Biosphäre aus, d. h. von einem größeren Anstieg des atmosphärischen CO_2 . Deshalb verschieben sich die Maxima, die für $(S_{\text{Ozean}}(t) + S_{\text{Land}}(t)) = Q_{\text{tot}}(t)$ auftreten sollten.

Die Ursachen der Unterschiede liegen in nichtlinearen Reaktionen der Senken [8] die in den verwendeten Erdsystemmodellen (ESMs) des Kohlenstoffkreislaufs angenommen werden. In den IPCC Szenarien wird eine verringerte CO_2 -Aufnahme durch den Boden aufgrund von Landnutzungsänderungen (Entwaldung ...) sowie eine verringerte Aufnahme durch die Ozeane angenommen. Dies kann aufgrund einer verringerten Pufferkapazität des Kohlenstoffsystems im Ozean eintreten.

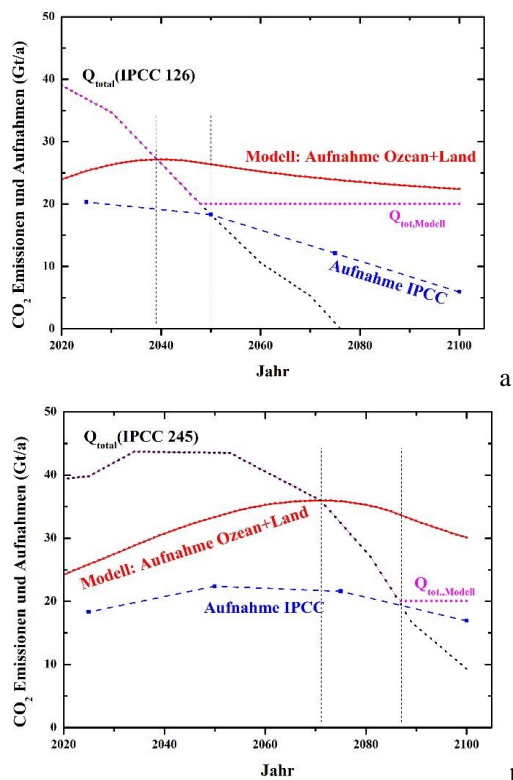


Abb. 7: Angenommene globale totale Emissionen Q_{tot} und CO_2 -Aufnahmen durch Ozean und Land im Modell und den IPCC Szenarien 126 (a) und 245 (b). Die Abweichungen sind zurückführbar auf geringere CO_2 Senken von Ozean und Land in den Erdsystemmodellen der IPCC Szenarien.

Wir gehen hier nicht weiter auf das komplexe Thema der Abschwächung der Senken in den IPCC Szenarien ein und erwähnen nur, dass eine kürzlich erschienene Veröffentlichung den Trend abnehmender Senkenkapazität gezeigt hat, der mit etwa 0,5 % pro Jahr jedoch noch nicht sehr ausgeprägt ist [6]. Eine andere Veröffentlichung [17] berichtet, dass die ozeanische Senke größer ist als derzeit angenommen. Im IPCC Bericht (S.772 in [8]) wird angemerkt, dass es zur Zeit noch keinen direkten Beweis für eine Abschwächung der Senken gibt, obwohl diese erwartet werden. Um das Verhalten der Senken besser einfach modellieren zu können, wäre eine vereinfachte, quantitativ nachvollziehbare, Erklärung wünschenswert.

Wir fassen den Vergleich unseres Modells mit dem Zeitraum 1960 bis 2020 (Abbildung 5) und den IPCC-Modellen (Abbildung 6) zusammen. Der Zeitraum 1960 bis 2020 ist recht gut modelliert. Dies ist nicht überraschend, da während dieses Zeitraums der Anteil α_{atm} des in der Atmosphäre abgelagerten CO_2 etwa konstant war und die Modellparameter von diesem Zeitraum stammen.

Im Vergleich zu den IPCC-Modellen 126 und 245 können die wichtigsten Merkmale der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen mit unserem Modell qualitativ zufriedenstellend beschrieben werden. Falls die Annahme, dass die kombinierte Senke von Ozean und Land auch in der Zukunft linear mit der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zunimmt, fällt der Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen jedoch immer deutlich geringer, d.h. deutlich optimistischer, aus als in den IPCC-Szenarien. Die Gründe für die offensichtlichen quantitativen Abweichungen (Unterschiede in der Zeitabhängigkeit α zwischen unserem Modell und den IPCC-Erdsystemmodellen) könnten in einer Unterrichtssequenz zu Emissionsszenarien weiter ausgearbeitet werden. Dies erfordert jedoch eine tiefere Auseinandersetzung mit den IPCC-Erdsystemmodellen und ihren Annahmen, was den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde.

Ungeachtet der quantitativen Unterschiede zu den aktuellen IPCC-Modellen kann man aus unserem einfachsten möglichen Zwei-Box-Modell viel darüber lernen, wie die Veränderung von Parametern in Emissionsszenarien zu Veränderungen der jeweiligen atmosphärischen Konzentrationen führt.

3.4. Weitere ausgewählte Emissionsszenarien

Sobald Lernende das erforderliche Tabellenkalkulationsprogramm geschrieben oder Gl. 5b auf andere Weise gelöst haben, kann das Modell im Unterricht auch dafür verwendet werden, ausgewählte neue Emissionspfade zu diskutieren, die durch ihre $Q_{\text{tot}}(t)$ -Werte im 21. Jahrhundert vorgegeben werden. Unser Ausgangspunkt ist dabei immer 2021 mit einer anfänglichen CO_2 -Konzentration von 416,4 ppm. Zunächst wollen wir modellieren, wie sich die atmosphärischen Konzentrationen verändern, wenn der Zeitrahmen für die Emissionsreduzierung verlängert

wird. Wir starten mit globalen Emissionen $Q_{\text{tot}}(2021) = 41$ Gt und analysieren fünf verschiedene Szenarien. Zunächst nehmen wir einen linearen Rückgang der globalen CO₂-Emissionen $Q_{\text{tot}}(t)$ an, der durch die Zeit $t_{50\%}$ bis zum Erreichen von 20 Gt/a, d.h. $\approx 50\%$ der derzeitigen Emissionen charakterisiert ist. Zwei Beispiele für $t_{50\%} = 50$ Jahre (0/0/50, grün) oder $t_{50\%} = 100$ Jahre (0/0/100, pink) sind in Abbildung 8a eingetragen. Nach Erreichen des 20 Gt/a Niveaus werden modellbedingt konstante Emissionen angenommen.

Weiterhin nehmen wir in einem dritten Szenario an, dass die Emissionen zunächst noch 20 Jahre lang konstant bleiben, bevor ein Rückgang innerhalb von $t_{50\%} = 50$ Jahre erfolgt (0/20/50, blau). Die beiden letzten Beispiele gehen zunächst von einem 10-jährigen Anstieg auf 50 Gt/Jahr (10/10/50, schwarz) bzw. 60 Gt (10/10/50, rot) aus, dann von einer kurzen 10-jährigen Plateauphase, bevor ein 50-jähriger linearer Rückgang auf 20 Gt/a erfolgt. Die resultierenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen dieser 5 Szenarien sind in Abbildung 8b dargestellt.

Wir betrachten zunächst die Szenarien mit sofort erfolgreichem linearem Rückgang der Emissionen in 50 oder 100 Jahren. Die offensichtlichste Veränderung beim Übergang von 50a (grün) auf 100a (pink) ist eine höhere maximale Konzentration in der Atmo-

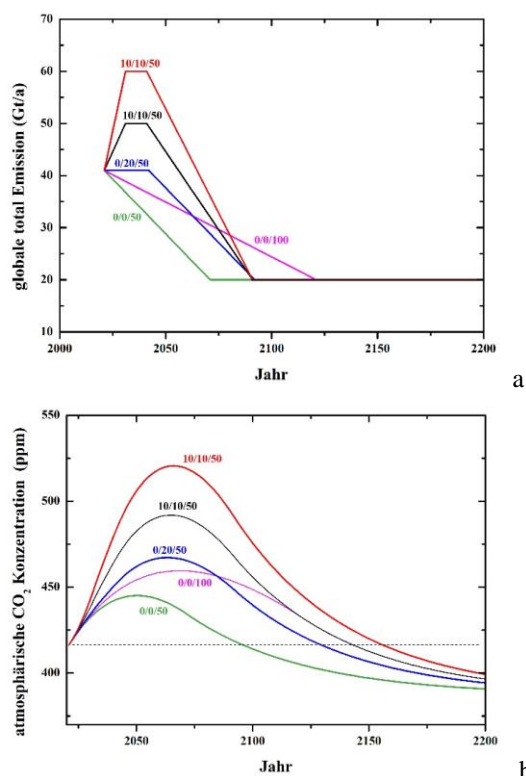


Abb. 8: a) Verschiedene Emissionsszenarien $Q_{\text{tot}}(t)$ von 2020 bis 2200 starten jeweils bei 41 Gt/a und enden alle (modellbedingt) bei 20 Gt/a; b) resultierende atmosphärische Konzentrationen; die Zahlentripel bedeuten (Zeitdauer Anstieg / Zeitdauer konstanter Emission / Zeitdauer Abfall auf 20 Gt/a) mit Zeiten in Jahren.

sphäre, die von 445 ppm auf ≈ 460 ppm steigt. Außerdem dauert es auch viel länger, bis das heutige CO₂-Niveau wieder erreicht ist. Für das hier optimistischste Szenario der Verringerung 0/0/50 dauert es bereits mehr als 65 Jahre, bis die atmosphärischen Konzentrationen wieder das derzeitige Niveau von, sagen wir, 420 ppm erreichen. Für 0/0/100 hat sich dieser Zeitraum bereits auf etwa 115 Jahre verlängert. Die realistischeren Emissionsszenarien, obwohl immer noch optimistisch, gehen von einem anfänglichen 20-jährigen Plateau aus oder sogar einem 10-jährigen Anstieg, gefolgt von einem 10-jährigen Plateau, bevor jeweils ein 50-jähriger Rückgang folgt. Alle diese Szenarien haben höhere Maximalkonzentrationen von 467 ppm (0/20/50, blau), 492 ppm (10/10/50, schwarz) und sogar fast 521 ppm (10/10/50, rot). Alle Szenarien benötigen auch recht lange Zeiträume jenseits von 100 Jahren, um zumindest wieder das heutige Niveau zu erreichen. Da die maximale Konzentration mit dem Temperaturanstieg zusammenhängt, ist es offensichtlich, dass nur das Szenario (0/0/50, grün) eine Chance hat, das abgespeckte Pariser Ziel von 2°C zu erreichen. Der Zeitraum, in dem die globalen Emissionen zurückgehen, ist von entscheidender Bedeutung: jede nennenswerte Verlängerung über 30 bis 50 Jahre hinaus muss vermieden werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben ein einfaches lineares Zwei-Box-Modell für die CO₂-Aufnahme in die Atmosphäre und die gemeinsame Senke Ozean/Land beschrieben. Es ermöglicht die Schätzung der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen als Funktion der globalen zeitabhängigen CO₂-Emissionen. Die Parameter des Modells basieren auf bekannten Daten des globalen Kohlenstoffbudgets sowie gemessener atmosphärischer CO₂-Konzentrationen für den Zeitraum 1960 bis 2021. Die Anwendbarkeit des Modells ist auf globale Emissionen oberhalb von etwa 50 % der derzeitigen Emissionen, d.h. auf ≥ 20 Gt/a beschränkt.

Die für 1960 bis 2020 empirisch gestützte Grundannahme des Modells ist, dass die CO₂-Aufnahme durch Ozean und Land linear von der atmosphärischen CO₂-Konzentration abhängt. Trotz der Einfachheit des Modells stimmen die Ergebnisse für diesen Zeitraum recht gut quantitativ mit den gemessenen Daten überein. Zudem stimmen sie auch qualitativ mit den Vorhersagen der aktuellen IPCC-Modellszenarien überein. Die jeweiligen quantitativen Abweichungen sind auf die Unterschiede der Annahmen der zukünftigen globalen CO₂-Aufnahme durch Senken zwischen unserem Modell und den Erdsystemmodellen der IPCC-Szenarien zurückzuführen.

In dieser Hinsicht verhält sich unser Modell ähnlich wie viele andere einfache Klimamodelle (SCMs). Ein Vergleich vieler SCMs (meist Modelle mit vielen Boxen) mit vollwertigen Erdsystemmodellen (ESMs) zeigt [18], dass ESMs systematisch eine geringere Kohlenstoffaufnahme im Ozean annehmen als SCMs.

Ähnliche Unterschiede gibt es auch bei der Land-senke. Folglich sind immer Unterschiede zwischen SCMs und ESMs zu erwarten. Allerdings haben einfache Modelle und damit auch unser Modell einen besonderen Vorteil gegenüber den komplexeren Erd-systemmodellen.

Unser Modell ermöglicht sehr schnelle qualitative Vorhersagen atmosphärischer CO₂-Konzentrationen für nahezu beliebige zeitabhängige Emissionsszenarien. Dies wurde für eine Reihe von Fällen demonstriert. Wir stellen fest, dass sich nach Übergangszeiten von etwa 100 bis 150 Jahren, je nach verwendetem Emissionsszenario, neue Gleichgewichts-CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre einstellen, die unterhalb des derzeitigen Niveaus von 420 ppm liegen können. Dies mag optimistischer erscheinen, als es tatsächlich ist. Denn in dieser langen Zeitspanne müssen wir mit den Folgen des Klimawandels zu-recht kommen. Deshalb gilt auf jeden Fall, dass wir sofort mit einer schnellen Reduktion der Treibhaus-gasemissionen beginnen müssen. Zudem werden im Modell mehrere Dinge vorausgesetzt. Erstens nehmen wir an, dass die Senkenwirkung von Ozean und Land auch weiterhin linear von der atmosphärischen Konzentration abhängt. Zweitens haben wir alle po-tenziellen zusätzlichen Senkenveränderungen oder hohe Emissionseinträge durch Kippelemente ver-nachlässigt. Dazu zählen beispielsweise weiteres Ab-holzen von Regenwäldern genauso wie durch den jetzt fortschreitenden Klimawandel ausgelöstes Frei-setzen von bislang gespeichertem Methan aus auftau-endem Permafrostboden etc.

Ungeachtet dieser Vereinfachungen weist unser Mo-dell eine Reihe von Vorteilen auf. Seine Einfachheit ermöglicht eine leichte Anwendbarkeit für den ein-führenden Unterricht zum Thema, und es erlaubt auch eine Vielzahl von studentischen Modellierungen, z.B. in Laborkursen oder sogar als Hausarbeit. Schließlich bietet dieses Modell eine einfache und schnelle Me-thode zur Untersuchung der Auswirkungen neuer, Emissionsszenarien auf die atmosphärischen Kon-zentrationen als Näherung erster Ordnung. Damit eig-net es sich sehr gut als erster Einstieg in das Thema komplexer Klimamodellierung.

5. Literatur

- [1] Onorato, P. et al, (2011): *'Home made' model to study the greenhouse effect and global warming*, Eur. J. Phys. 32, 363
- [2] Wilson, D.J.; Gea-Banacloche, J. (2012): *Simple model to estimate the contribution of atmospheric CO₂ to the Earth's greenhouse effect*, American Journal of Physics 80, 306–315
- [3] Schwartz, S.E. (2018): *Resource Letter GECC-2: The Greenhouse Effect and Climate Change: The Intensified Greenhouse Effect*, American Journal of Physics 86, 645–656
- [4] Roether, W. (1980): *The effect of the ocean on the global carbon cycle*, Experientia 36/9, 1017-1025
- [5] Joos, F. et al. (1996): *An efficient and accurate representation of complex oceanic and bio-sphere models of anthropogenic carbon uptake*, Tellus 48 B, 397-417
- [6] Bennesen, M.; Hillebrand, E.; Koopman, S.J. (2019): *Trend analysis of the airborne fraction and sink rate of anthropogenically released CO₂*, Biogeosciences 16, 3651–3663
- [7] Prentice, I.C. et al (2001): *The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide*, Ch. 3 in Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC
- [8] Canadell, J.G. et al, (2021): *Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feed-backs*, Chap. 5 in Climate Change: The Physi-cal Science Basis, WG1 contribution to 6th Assessment Report of IPCC, Eds. V. Masson-Del-motte et al , Cambridge University Press, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [9] Hoppenau, S. (1992): *Future concentrations of atmospheric greenhouse gases CO₂, CFC, and CH₄: An assessment on the educational level* , American Journal of Physics 60, 408–415
- [10] Holter, Ø.; Ingebretsen, F. ; Kanestrøm, I. (1999): *Analytic CO₂ model calculations and global temperature*, Eur. J. Phys. 20, 483-494
- [11] Tomizuka, A. (2009): *Is a box model effective for understanding the carbon cycle?*, American Journal of Physics 77, 156–163
- [12] Fano, G. (2010): *A primer on the carbon cycle*, American Journal of Physics 78, 367–376
- [13] Metz, B. et al (Eds) (2005): *Carbon Dioxide Capture and Storage*, Chapter 6, Ocean Storage, IPCC, Cambridge University Press, <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>, see also: <https://archive.ipcc.ch/report/srccls/>
- [14] Friedlingstein, P. et al, (2022): *Global Carbon Project 2022*, Earth Syst. Sci. Data 14, 4811-4900, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- [15] Mauna Loa Data of atmospheric CO₂ and other greenhouse gases from the Global Monitoring Laboratory / Earth System Research Laboratories, <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- [16] *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Washing-ton, DC: The National Academies Press (2019). doi: <https://doi.org/10.17226/25259>
- [17] Wang, W.-L. et al (2023): *Biological carbon pump estimate based on multidecadal hydro-graphic data*, Nature, Dec. 6th <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06772-4>
- [18] Melnikova, I. et al (2023): *Assessing carbon cycle projections from complex and simple models under SSP scenarios*, Climate Change 176, 168 <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03639-5>