

Warum die wachsende CO₂-Konzentration weitgehend menschengemacht ist

[latexpage]

Häufig hören wir das Argument, dass die natürlichen Emissionen, sei es durch

- Atmung der Pflanzen, Tiere und Menschen
- biologische Zersetzungsprozesse
- Ausgasung der Ozeane

so groß seien, dass die anthropogenen Emissionen im Vergleich kaum ins Gewicht fallen und quasi „im Rauschen untergehen“.

In der Tat sind die Respiration mit 130 GtC/a und die Ausgasung aus den Ozeanen mit 80 GtC/a wesentlich größer als die 9,5 GtC/a, die durch Verbrennung fossiler Energieträger und Zementproduktion zustandekommen.



Da liegt der Schluß nahe, anzunehmen, dass angesichts der großen natürlichen Umsätze von 210 GtC/a die anthropogenen Emissionen nur 5% ausmachen und daher relativ unbedeutend sind.

Dies ist aber ein Fehlschluß: Der Respiration steht ein gleichgroßer, sogar etwas größerer Betrag der Nettoprimärproduktion und der Ausgasung von 80 GtC/a ebenfalls ein leicht größerer Betrag der Absorption in den Ozeanen gegenüber.

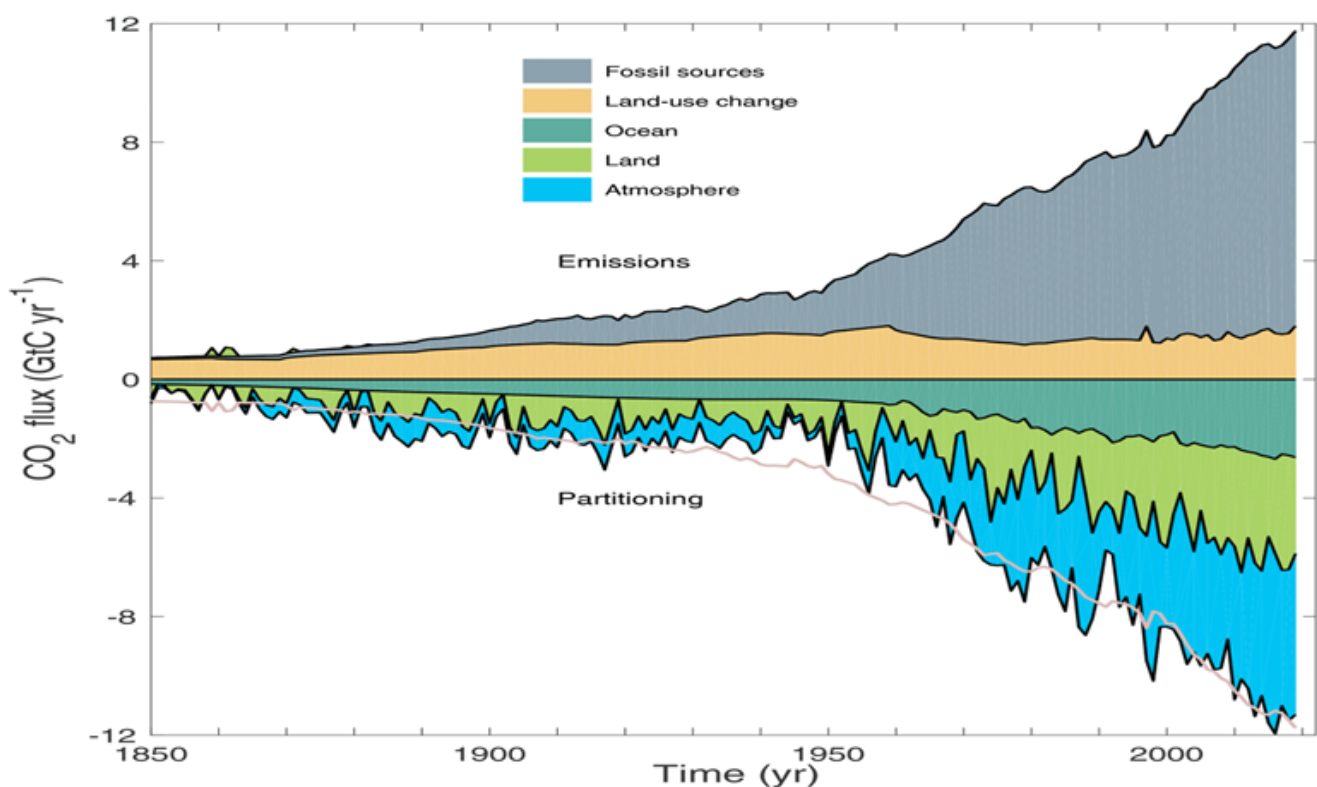
Zwei einfache Tatsachen helfen, die Frage zu klären:

1. **Die jährlichen anthropogenen Emissionen sind deutlich größer als der Anstieg der CO₂-Konzentration.** Das heißt, dass es auf jeden Fall mehr Emissions-CO₂ gibt als was von der der Atmosphäre aufgenommen wird. Die

„restlichen“ Einflußfaktoren müssen demnach zwingend in ihrer Gesamtwirkung eine Kohlenstoffsenke sein – so stark, dass sie heute bereits mehr als die Hälfte des anthropogen erzeugten CO₂ aufnehmen.

2. In der Jahresbilanz sind **sowohl die Ozeane als auch die Landpflanzen und mit ihnen die gesamte biologische Welt seit 100 Jahren strikte Kohlenstoffsenken** sind, sie nehmen übers Jahr gemittelt jeweils mehr als 2 Gt/a mehr Kohlenstoff auf als sie abgeben.

Das folgende Diagramm zeigt sowohl die anthropogenen Emissionen einschließlich Landnutzungsänderungen (Abholzung) als positive Beiträge während die „Verwendung“ dieser Emissionen als Verteilung nach Ozeanen, Landpflanzen und Anstieg der atmosphärischen Konzentration dargestellt ist:



Entscheidend ist, dass die unterjährigen natürlichen Austauschprozesse sich gegenseitig aufheben und nichts zum Anstieg der CO₂-Konzentration beitragen, obwohl die beteiligten Mengen sehr viel größer als die anthropogenen Emissionen sind. [Die Unterscheidung der Aufenthaltszeit und Ausgleichszeit hat Cawley in einer wissenschaftlichen](#)

Publikation vorgenommen. Hier möchte ich mich auf eine anschauliche vereinfachte Argumentation beschränken:

Eine Senke kann nicht gleichzeitig Quelle sein. Auch wenn es jahreszeitliche Schwankungen gibt, entscheidend ist die Bilanz am Ende des Jahres – wie bei einem Bankkonto. Darüber hinaus sind die Schwankungen der Art, dass die verstärkte Senkenwirkung aufgrund des Pflanzenwachstums im Frühjahr und Sommer stets dem folgenden Abbau und Zerfall vorausgeht. Die biologische Welt ist aus prinzipiellen Gründen immer eine Netto-Senke.

Die Ozeane kann man als riesige Kohlenstoff-Speicher mit der etwa 50 fachen Kapazität der Atmosphäre auffassen, die auf lange Sicht die CO₂-Konzentration derjenigen der Atmosphäre „angleichen“, unter korrekter Berücksichtigung der nicht ganz trivialen physikalischen und chemischen Prozesse. Wir können davon ausgehen, dass bislang die Ozeane auf die vorindustrielle CO₂-Konzentration von etwa 280 ppm angepasst sind und daher noch für sehr lange Zeit als effektive Senke wirken.

Daher müssen wir die Tatsache akzeptieren, dass die menschlichen Aktivitäten tatsächlich in den letzten 150 Jahren tatsächlich für ein Anwachsen der CO₂-Konzentration um 50% gesorgt haben. An anderer Stelle wird der genaue Mechanismus der Abhängigkeit der Konzentration von den anthropogenen Emissionen behandelt. Damit ist allerdings noch nichts darüber gesagt, ob die Auswirkungen der erhöhten Konzentration eher nützlich oder schädlich sind.

Nachtrag 2.6.2024 – Kleine Einschränkung

Aufgrund neuerer Recherchen lässt sich ein Einfluss der globalen mittleren Wasseroberflächentemperatur auf die CO₂-Konzentration nachweisen. Da nicht die Konzentration mit den Temperaturschwankungen korreliert ist, sondern die natürlichen Emissionen, ist die Kausalität so, dass die

Temperaturschwankungen zu Emissions- und schließlich zu Konzentrationsänderungen führen. [Der definitive Nachweis bezieht sich bislang auf die Temperaturschwankungen, die vom langfristigen Trend abweichen, sowie auf die Daten der Eisbohrkerne aus der Antarktis.](#) Der langfristige Einfluß der Temperatur auf die CO_2 Gleichgewichtskonzentration dürfte bei 13 ppm/°C liegen, also bei knapp 10% des CO_2 Konzentrationsanstiegs seit dem Beginn der Industrialisierung. Maximal möglich sind 65 ppm/°C. Das wäre dann schon fast die Hälfte.

Temperaturabhängigkeit der natürlichen CO_2 Quellen und Senken

[`latexpage`]

Bei dem [in diesem Blog](#) und [anderswo publizierten einfachen Modell der \$\text{CO}_2\$ -Senken und der natürlichen Emissionen](#) tauchte in der Diskussion darüber immer wieder die Frage auf: Wie wird die – offensichtliche – Temperaturabhängigkeit der natürlichen CO_2 -Quellen, beispielsweise die ausgasenden Ozeane, oder der Senken wie die Photosynthese, berücksichtigt? Denn in dem Modell kommt keine langfristige Temperaturabhängigkeit vor, allenfalls ein kurzfristig zyklische. Ein langfristiger Trend der Temperaturabhängigkeit ist in den letzten 70 Jahren auch bei sorgfältiger Analyse nicht erkennbar.

[In der zugrunde liegenden Publikation](#) wurde ausgeschlossen, dass der Absorptionskoeffizient temperaturabhängig sein kann (Kapitel 2.5.3). Allerdings blieb dabei offen, ob nicht doch

eine direkte Temperaturabhängigkeit der Quellen oder Senken möglich ist. Und warum diese nicht aus der statistischen Analyse erkennbar ist. Dies wird in dem vorliegenden Beitrag behandelt.

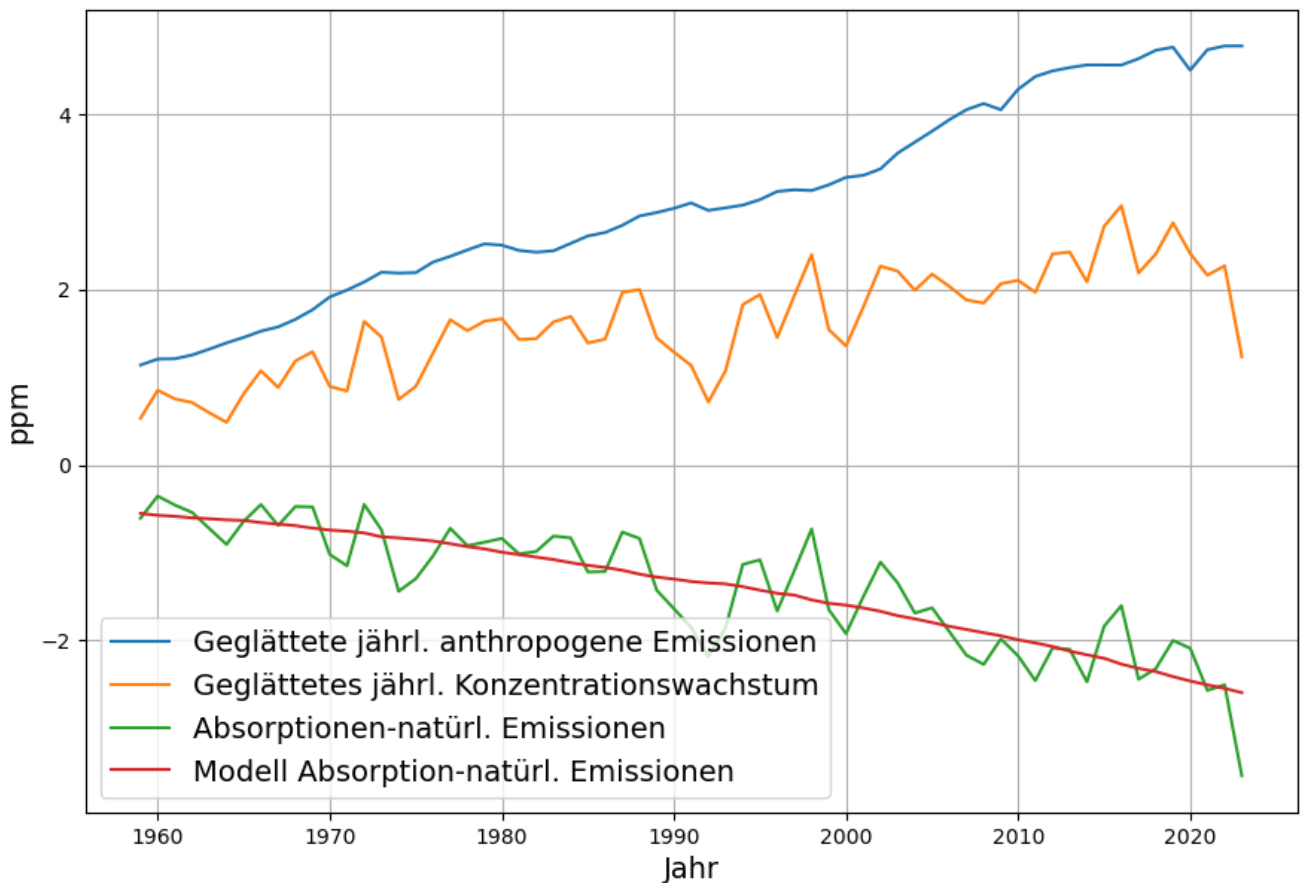
Ursprüngliches temperaturunabhängiges Modell

Die vereinfachte Form der CO₂ Massenerhaltung in der Atmosphäre ([siehe Gleichungen 1,2,3 der Publikation](#)) mit anthropogenen Emissionen E_i im Jahre i , den sonstigen, überwiegend natürlichen Emissionen N_i (zur Vereinfachung werden die Landnutzungsemissionen den natürlichen Emissionen zugeschlagen), dem Zuwachs des CO₂ in der Atmosphäre $G_i = C_{i+1} - C_i$ (C_i ist atmosphärische CO₂ Konzentration) und den Absorptionen A_i ist:

$$E_i - G_i = A_i - N_i$$

Die Differenz der Absorptionen und der natürlichen Emissionen wurde linear modelliert mit einem konstanten Absorptionskoeffizienten a und einer Konstante n für die jährlichen natürlichen Emissionen:

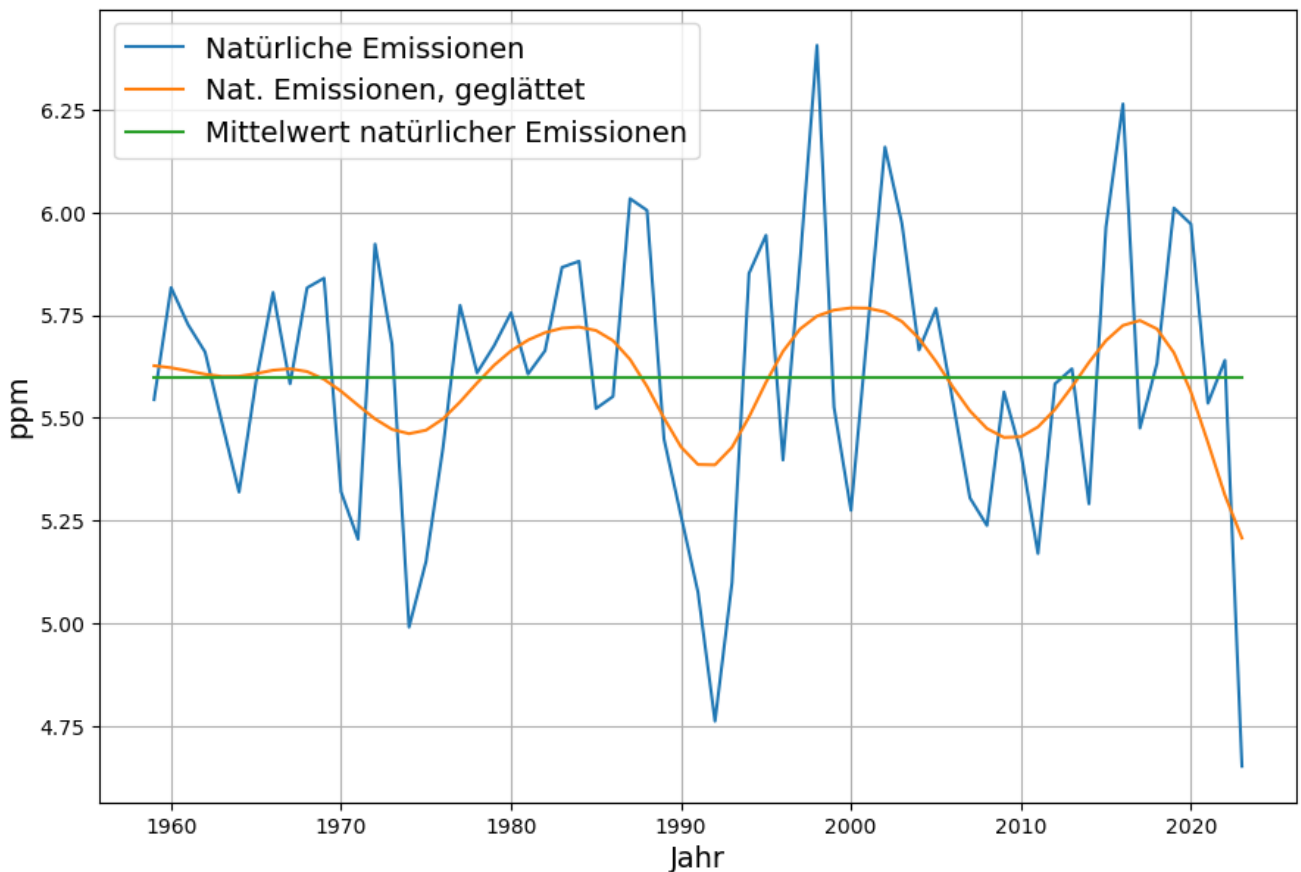
$$A_i - N_i = a \cdot C_i + n$$



Während die Absorptionskonstante und **der lineare Zusammenhang zwischen Absorption und Konzentration physikalisch sehr gut begründet** und belegt ist, erscheint die Annahme der konstanten natürlichen Emissionen willkürlich. Daher ist es erhellend, statt eines konstanten Ausdrucks N_i stattdessen aus den Messdaten und der berechneten Absorptionskonstanten a das Residuum

$$N_i = G_i - E_i + a \cdot C_i$$

zu betrachten:



Der Mittelwert von N_i ergibt den konstanten Modellterm n . Mit einer leichten Glättung ergibt sich ein periodischer Verlauf. [Roy Spencer hat diese Schwankungen mit dem El Nino begründet](#), wobei nicht eindeutig ist, ob die Schwankungen den Absorptionen A_i oder den natürlichen Emissionen N_i zuzuordnen sind. **Aber es ist keinerlei langfristiger Trend erkennbar.** Daher ist die Frage zu klären, warum zwar kurzfristige Temperaturabhängigkeiten vorhanden sind, aber die langfristige globale Erwärmung im Modell anscheinend keine Entsprechung hat.

Temperaturabhängiges Modell

Nun erweitern wir das Modell, indem wir sowohl für die Absorptionen A_i als auch für die natürlichen Emissionen N_i zusätzlich eine lineare Temperaturabhängigkeit zulassen. Da unsere Messdaten nur deren Differenz liefern, können wir die Temperaturabhängigkeit dieser Differenz in einer einzigen linearen Funktion der Temperatur T_i , also $b \cdot T_i + d$ darstellen. Gesetzt den Fall, dass sowohl A_i also auch N_i temperaturabhängig sind, ist die Differenz der

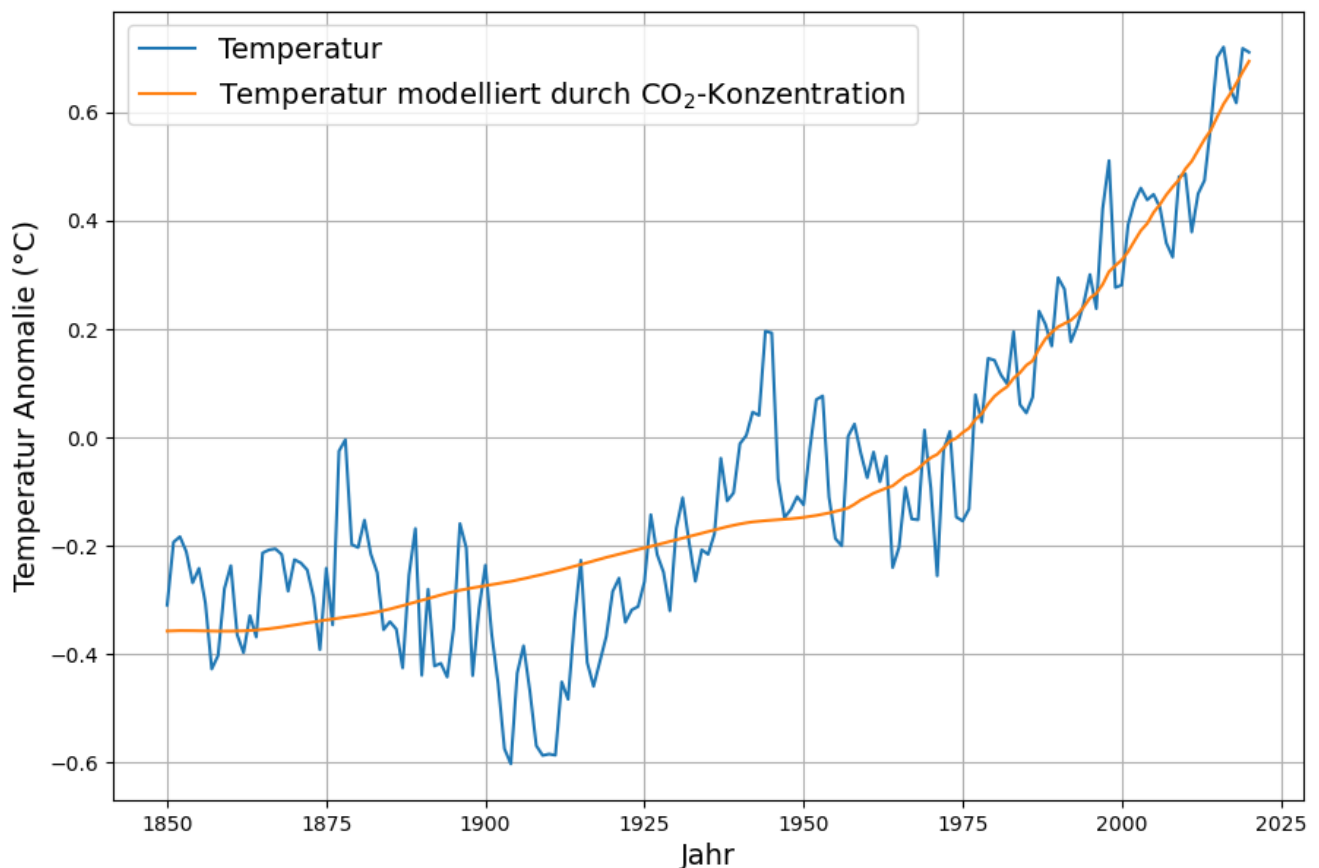
dazugehörigen linearen Ausdrücke wieder einen linearen Ausdruck. Demnach hat das erweiterte Modell diese Gestalt.

$$A_i - N_i = a \cdot C_i + n + b \cdot T_i + d$$

Im Prinzip könnten n und d zu einer einzigen Konstanten zusammengefasst werden. Da aber d von der verwendeten Temperaturskala abhängt, und n von der Maßeinheit der CO_2 Konzentration, belassen wir es bei 2 Konstanten.

CO_2 Konzentration als Proxy für Temperatur

Wie bereits [in der Publikation im Kapitel 2.3.2 dargelegt](#), gibt es zwischen der CO_2 -Konzentration und der Temperatur einen Zusammenhang mit hoher Korrelation. Woher dieser Zusammenhang kommt, d.h. ob es einen kausalen Zusammenhang gibt (und in welcher Richtung) ist für diese Untersuchung unerheblich. Allerdings stellen wir hier nicht den Zusammenhang zwischen T und $\log(C)$ her, sondern den zwischen T (Temperatur) und C (CO_2 Konzentration ohne Logarithmus).



Demzufolge kann die Temperatur-Anomalie aus der Konzentration mit der linearen Funktion

$$T_i = e \cdot C_i + f$$

mit

$$e=0.0083, f=-2.72$$

approximiert werden.

Verwendung des CO₂-Proxy in der temperaturabhängigen Gleichung

Setzt man für die Temperatur deren Proxy-Funktion in die temperaturabhängige Gleichung ein, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$A_i - N_i = a \cdot C_i + n + b \cdot (e \cdot C_i + f) + d$$

bzw.

$$A_i - N_i = (a + b \cdot e) \cdot C_i + (n + b \cdot f) + d$$

Der Ausdruck auf der rechten Seite hat jetzt wieder die gleiche Gestalt wie die ursprüngliche Gleichung, also

$$A_i - N_i = a' \cdot C_i + n'$$

mit

$$a' = a + b \cdot e$$

$$n' = n + b \cdot f + d$$

Schlussfolgerungen

Daher können bei einer linearen Abhängigkeit der Temperatur von der CO₂-Konzentration Temperatureffekte der Senken und Quellen nicht von Konzentrationseffekten unterschieden werden, beide gehen in die „effektive“ Absorptionskonstante a' und die Konstante der natürlichen Emissionen n' ein. Daher enthält das einfache lineare Quellen- und Senkenmodell sämtliche linearen Temperatureinflüsse.

Das erklärt die erstaunliche Unabhängigkeit des Modells von der globalen Temperaturerhöhung der letzten 70 Jahre.

Außerdem legt dieser Zusammenhang nahe, dass sich das Absorptionsverhalten der beiden atmosphärischen Senken auch in Zukunft nicht ändert.

Will man allerdings wissen, wie sich die Temperatur genau auf die Quellen und Senken auswirkt, müssen andere Datenquellen herangezogen werden. Für die Prognose künftiger CO₂-Konzentration aus anthropogenen Emissionen ist dieses Wissen aufgrund des gefundenen Zusammenhangs nicht notwendig, vorausgesetzt der lineare Zusammenhang zwischen Temperatur und CO₂-Konzentration bleibt uns noch eine Weile erhalten.

Emissionen des Kohlenstoffkreislaufs

In der Klimadiskussion wird zunehmend der sog. „CO₂-Fußabdruck“ von Lebewesen, insbesondere des Menschen und von Nutztieren als Problem deklariert, bis dahin,

- das Essen von Fleisch zu diskreditieren,
- Nutztiere abzuschlachten (z.B. in Irland)
- oder sogar junge Menschen davon abzuhalten, Kinder zu bekommen.

Diese Diskussion beruht auf falschen Voraussetzungen. Es wird so getan, als ob das Ausatmen von CO_2 dieselbe „klimaschädliche“ Qualität hätte wie das Verbrennen von Kohle oder Erdöl.

Eine genauere Analyse des Kohlenstoffkreislaufs zeigt den Unterschied.

Der Kohlenstoffkreislauf

Alles Leben der Erde ist aus Kohlenstoffverbindungen aufgebaut.

Der Beginn der sogenannten Nahrungskette sind die Pflanzen, die mit der Photosynthese aus dem CO_2 der Atmosphäre vorwiegend Kohlehydrate, teilweise auch Fette und Öle erzeugen und damit sowohl Kohlenstoff als auch Energie speichern.

Die weitere Verarbeitung dieser Kohlenstoffverbindungen teilt sich auf mehrere Zweige auf, bei denen wieder eine Umwandlung in CO_2 erfolgt:

- der unmittelbare Energieverbrauch der Pflanze, die „pflanzliche Atmung“,
- der – überwiegend saisonale – Zerfall eines Teils oder der ganzen Pflanze, und Humusbildung,
- der Energieversorgung von Tieren und Menschen als Nahrung. Hier findet außer der direkten Energieversorgung eine Umwandlung in Eiweiße und Fette statt, zum Teil auch in Kalk.
- Mit der Nahrungskette werden die Eiweiße und Fette weitergereicht.
- Im Laufe des Lebens geben Pflanzen, Tiere und Menschen einen Teil des über die Nahrung aufgenommenen

Kohlenstoffs durch Atmung wieder als CO_2 , teilweise auch als Methan ab.

- Mit der Verwesung der Tiere und Menschen wird über Zersetzungsprozesse teilweise das verbliebene CO_2 wieder freigesetzt, teilweise bildet sich Humus, der kohlenstoffhaltig ist.
- Der biologisch gebildete Kalk bindet das CO_2 langfristig. Z.B. bindet jede Eierschale 5g CO_2 für sehr lange Zeit.

Menschen und Tiere sind CO_2 Senken, keine Quellen

Vielfach wird gesagt, dass Menschen und Tiere über Atmung etc. Kohlenstoff als CO_2 oder Methan in die Atmosphäre geben, und daher zu die Emissionen vergrößern. Um zu zeigen, dass sie zusammen mit ihrer Nahrungskette dennoch CO_2 -Senken sind, wollen wir **den als CO_2 oder Methan ausgeschiedenen Kohlenstoff zurückverfolgen**.

Dieser kommt entweder direkt über den Stoffwechsel aus der aufgenommenen Nahrung, oder aus den Fettreserven des eigenen Organismus. Die Fettreserven wiederum stammen aus der Nahrung, die in der Vergangenheit aufgenommen wurde.

Nun stammt **alle Nahrung** – mit Ausnahme von Medikamenten – **aus Tieren oder Pflanzen**. Tiere ernähren sich wiederum von Tieren oder Pflanzen. Am Ende der Nahrungskette stehen in jedem Falle Pflanzen. Diese holen sich all ihren Kohlenstoff aus dem CO_2 der Atmosphäre.

Das heißt, dass jedes Kohlenstoffatom, dass wir als CO_2 ausatmen, je nach Länge der Nahrungskette ursprünglich und daher vorher aus dem CO_2 der Atmosphäre stammt und gebunden worden war. Daher **stammt sämtlicher Kohlenstoff aller Lebewesen, sei er gebunden oder als CO_2 ausgeatmet, letztendlich aus der Atmosphäre über die Photosynthese**. Das wird sehr anschaulich vom berühmten Nobelpreisträger Prof. Richard Feynman am Beispiel eines Baumes beschrieben (in englischer Sprache):

Alle Lebewesen sind temporäre Speicher des CO₂. Die geschilderten Mechanismen bewirken unterschiedliche Halbwertszeiten dieser Speicherung.

Die Eingriffe des Menschen bewirken in der Regel eine Verlängerung der Speicherung und damit in der Konsequenz ein nachhaltigerer Umgang mit CO₂:

- Hauptsächlich durch Konservierung und damit Aufhalten der Fäulnisprozesse. Das bezieht sich nicht nur auf das haltbar machen von Lebensmitteln, sondern auch durch langfristige Konservierung von Holz, solange die Holzverwertung nachhaltig ist. Auf diese Weise ist das Bauen mit Holz eine langfristige Bindung von CO₂.
- Das Getreide vom letzten Jahr wird i.d.R. gelagert und erst etwa ein Jahr später zu Brot etc. weiterverarbeitet. In der Zwischenzeit sind die diesjährigen Getreidepflanzen schon wieder nachgewachsen. Damit sind die stoffwechselbedingten Emissionen von Mensch und Tier schon kompensiert, bevor sie stattfinden. Würde das Getreide ohne Verarbeitung verrotten, dann wäre es bereits im Herbst letzten Jahres wieder in CO₂ zerfallen. Würde gar kein Getreide angebaut, würde von vorneherein sehr viel weniger CO₂ der Luft gebunden. Es ist nachgewiesen, dass die Intensivierung der Landwirtschaft neben der gestiegenen CO₂-Konzentration in der Atmosphäre maßgeblich zum Ergrünen der Erde seit 30 Jahren beigetragen hat, u.a. in Form von sich jährlich steigenden Spitzenernten.
- Auch die Aufzucht von Nutztieren bedeutet eine CO₂-Speicherung, nicht nur in Form der langlebigen Knochen. Die Nutztiere spielen auch eine wichtige Rolle bei der wichtigen Beseitigung von Graspflanzen (siehe weiter unten).

Einschränkung – Düngung und Mechanisierung der Landwirtschaft

3 Faktoren führen dazu, dass bei der Erzeugung von Lebensmitteln u.U. doch mehr CO₂ freigesetzt wird als in der „freien Natur“, nämlich wenn Prozesse beteiligt sind, bei denen fossile Brennstoffe zum Einsatz kommen:

- Die Verwendung von chemisch erzeugten Düngemitteln
- die Mechanisierung der Landwirtschaft
- die Industrialisierung der Lebensmittelerzeugung.

Aufgrund sehr unterschiedlicher Erzeugungsprozesse ist es sehr irreführend, von einem produktspezifischen CO₂-Fußabdruck zu sprechen.

Um ein wichtiges Beispiel herauszugreifen: Rindfleisch wird gewöhnlich mit einem extrem hohen „CO₂-Fußabdruck“ versehen. Das **Rindfleisch**, das von Rindern stammt, die weitgehend auf einer – ohne Kunstdünger gedüngten – Weide großgezogen werden, **hat einen vernachlässigbar kleinen „CO₂-Fußabdruck“**, im Gegensatz zu dem, was in den üblichen Tabellen verbreitet wird. Dasselbe gilt für Wildtiere, die bei der Jagd erlegt werden.

Ein Beispiel, das die Doppelzüngigkeit der Diskussion illustriert, ist die **Erzeugung von Bio-Treibstoffen**. Dabei werden ganz genauso wie bei der übrigen Landwirtschaft Düngemittel und mit fossiler Energie betriebene mechanische Geräte eingesetzt. Die erzeugten Treibstoffe gelten jedoch als nachhaltig und „CO₂-frei“. Derselbe Maßstab muß auch für die Erzeugung von Lebensmitteln gelten.

Bei der Düngung ist noch zu berücksichtigen, dass **gedüngte Pflanzen sehr viel besser wachsen und daher auch mehr CO₂ aus der Luft absorbieren**. Das heißt, dass ein großer Teil des durch Düngung bedingten „Fußabdrucks“ durch das verbesserte

Wachstum der Pflanze und daher erhöhte Photosynthese-Tätigkeit wieder kompensiert wird.

Abhängigkeiten

Die wichtigste Erkenntnis aus Biologie und Ökologie ist, dass es nicht in unserer Beliebigkeit ist, einzelne Elemente der sensiblen Ökologie zu entfernen, ohne dem Ganzen großen Schaden zuzufügen.

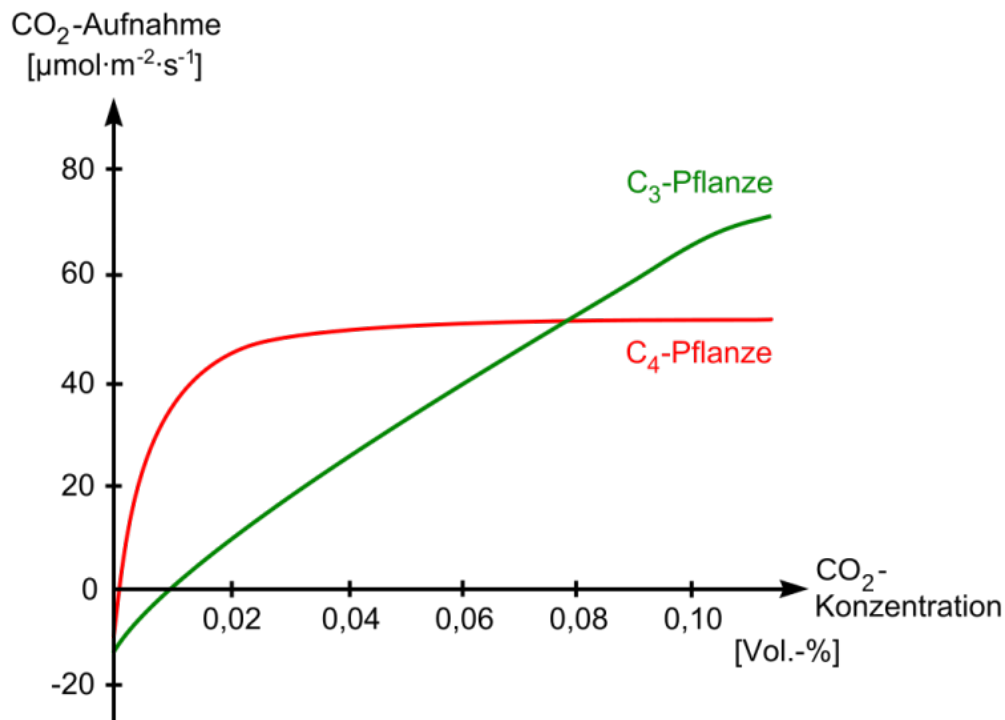
Typische Beispiele solch schädlicher Einflüsse sind:

- **Überweidung**, d.h. Verödung durch Abfressen der (pflanzlichen) Lebensgrundlagen. Beispiele dafür sind weithin bekannt. Die „Überweidung“ kann auch durch „gut gemeinte“ und als positiv angenommene Eingriffe wie die „Verbesserung der Wasserqualität“ im Bodensee erfolgen, mit dem Ergebnis, dass es [für Pflanzen und Tiere im Wasser nicht mehr genug Nahrung gibt](#).
- Weniger bekannt ist die „**Unterweidung**“, insbesondere das Nicht-Beseitigen von verdorrtem Steppengras in den riesigen semiariden Gebieten der Erde. Zur Lösung dieses Problems hat Alan Savory das Konzept des „[Holistic Managements](#)“ mit großem Erfolg eingeführt. Dieses Konzept beinhaltet als wesentliche Komponente [die Ausweitung der Viehzucht](#).

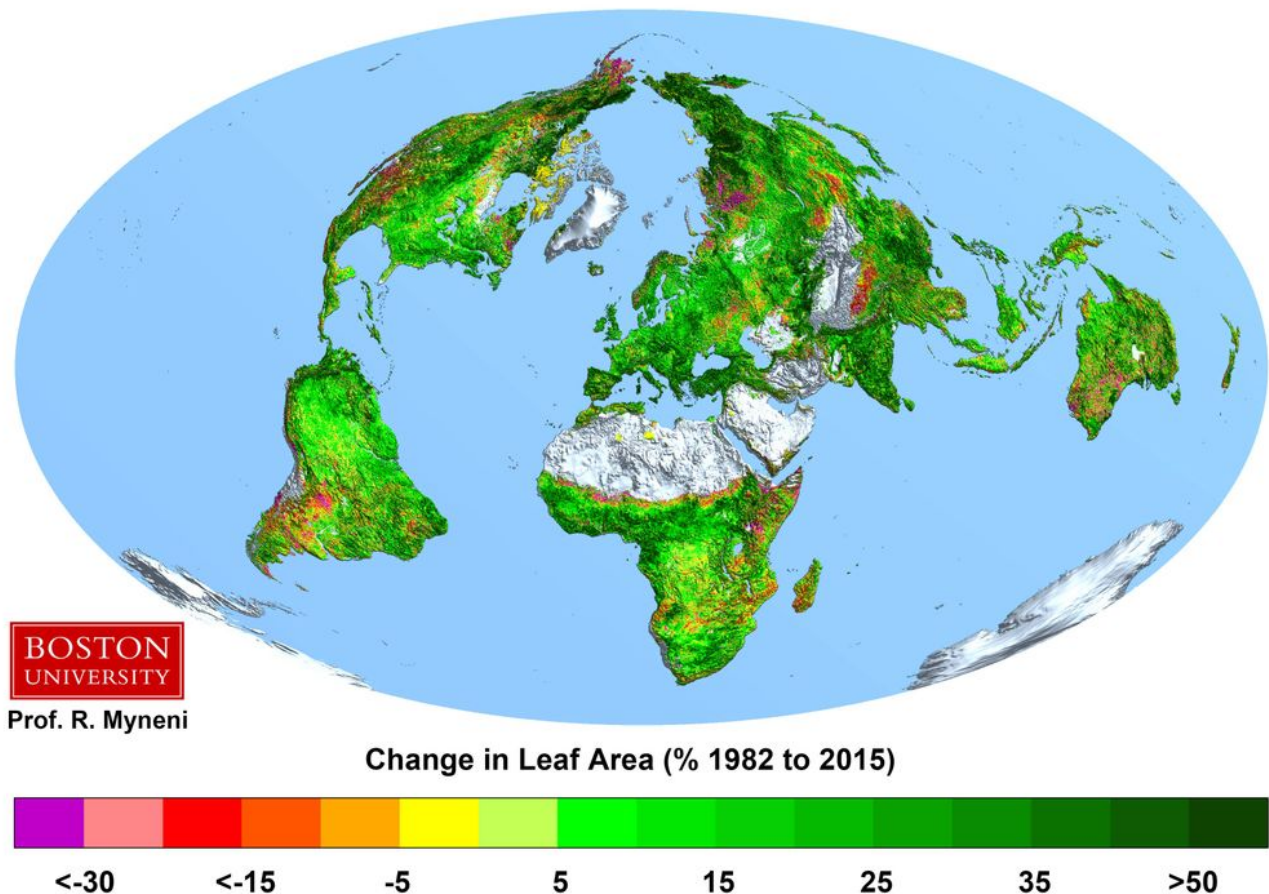
Werden Pflanzen nicht durch „größere“ Tiere weiterverwertet, dann werden sie von Mikroorganismen verarbeitet und zerfallen in der Regel schnell wieder unter Freisetzung des gebundenen CO₂, teilweise werden sie in Humus umgewandelt. **Für die CO₂-Konzentration der Atmosphäre ist also nichts gewonnen, wenn z.B. Rinder oder Schweine abgeschlachtet werden**, um angeblich die CO₂-Bilanz zu verbessern. Im Gegenteil, die Tiere verlängern die Lebensdauer der organischen kohlenstoffbindenden Substanz.

Abhängigkeit des Pflanzenwachstums vom CO₂

Pflanzen gedeihen besser, je höher die CO₂-Konzentration der Atmosphäre ist, insbesondere die C₃-Pflanzen:



Für das Wachstum der Pflanzen war der Anstieg der CO₂-Konzentration der letzten 40 Jahre ausgesprochen günstig, [die Welt ist signifikant grüner geworden](#), mit dem Nebeneffekt der Senkenwirkung, also Aufnahme des zusätzlichen anthropogenen CO₂:



Die C_3 -Pflanzen erreichen erst bei einer Konzentration von 800 ppm dieselbe Aufnahme von CO_2 wie C_4 Pflanzen. Darum werden vielen Gewächshäuser mit CO_2 angereichert.

Schlußfolgerungen

Mit dem Wissen um diese Zusammenhänge ergeben sich zwingende Schlussfolgerungen:

1. Aufgrund des Primats der Photosynthese und die Abhängigkeit allen Lebens davon **ist die Gesamtheit der Lebewesen eine CO_2 -Senke**, mittel- und langfristig kann also die CO_2 -Konzentration aufgrund des Einflusses der Lebewesen nur abnehmen, niemals zunehmen.
2. Dabei hängt die photosynthetische Aktivität und daher auch die Senkenwirkung stark von der CO_2 -Konzentration ab. Je größer die CO_2 -Konzentration, desto größer ist die Senkenwirkung aufgrund des CO_2 -Düngungs-Effekts,

vorausgesetzt die Pflanze bekommt genug Wasser und Licht und ggf. den notwendigen Dünger.

3. Alle Lebewesen sind CO₂-Speicher, mit unterschiedlichen Speicherzeiten.
4. Es gibt mindesten 3 Formen langfristiger CO₂-Bindung gibt, die zur Abnahme der CO₂-Konzentration führen:
 - Kalkbildung
 - Humusbildung
 - nichtenergetische Holznutzung
5. Der Einsatz von „technischen Hilfsmitteln“, die fossile Energie verbrauchen, muss bei den Betrachtungen getrennt werden von dem natürlichen Kohlenstoffkreislauf. Man kann also nicht sagen, ein bestimmtes Lebensmittel hat einen festen „CO₂-Fußabdruck“. Der hängt einzig und allein von der Produktionsweise und der Tierhaltung ab. **Eine „faire“ Betrachtung muss hier genauso wie z.B. bei Elektrofahrzeugen annehmen, dass die technischen Hilfsmittel der Zukunft oder die Herstellung von Düngemitteln nachhaltig sind.**

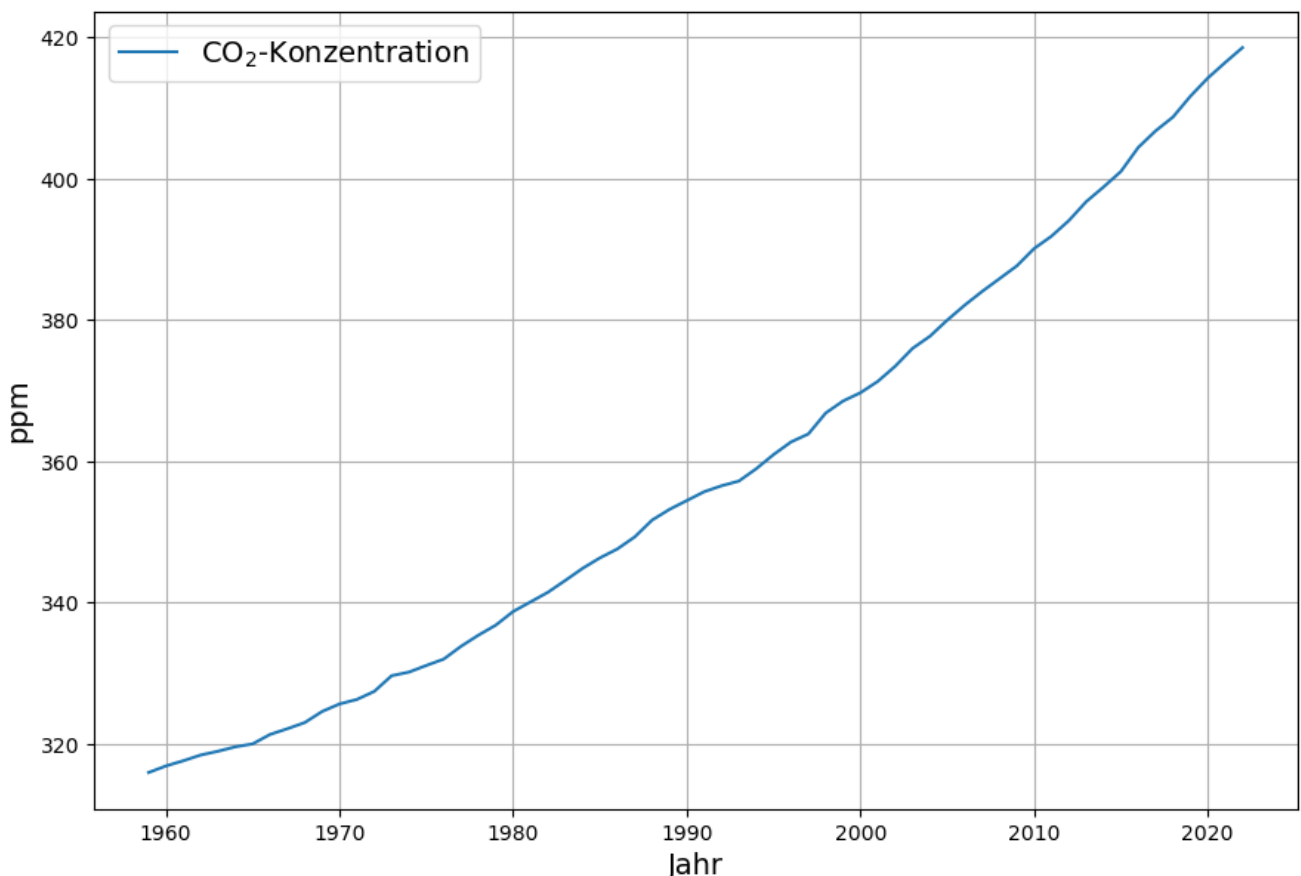
Dazu kommt, dass unter Berücksichtigung des Wissens, dass **mehr als die Hälfte der aktuellen anthropogenen Emissionen im Laufe des Jahres wieder absorbiert werden**, führt bereits eine 45% Senkung der aktuellen Emissionen zu der „Netto-Null“ Situation, wo die atmosphärische Konzentration nicht mehr zunimmt. Selbst wenn wir die weltweiten Emissionen nur wenig ändern (was angesichts der energiepolitischen Entscheidungen in China und Indien sehr wahrscheinlich ist), wird noch in diesem Jahrhundert eine Gleichgewichtskonzentration von 475 ppm erreicht, die keinen Grund zur Beunruhigung gibt.

Der Wendepunkt der CO₂-Konzentration

[latexpage]

Und steigt und steigt...?

Auf den ersten Blick steigt die atmosphärische CO₂-Konzentration fortwährend an, dargestellt an den Jahresmittelwerten, die in Maona Loa gemessen werden (ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_mm_mlo.txt):



Die zentrale Frage, die sich stellt, ist die, ob die Konzentration immer schneller wächst, d.h. ob jedes Jahr mehr dazukommt? Dann wäre die Kurve konkav, also also nach oben gekrümmt.

Oder wird der jährliche Anstieg der Konzentration immer

geringer? Dann wäre sie konvex, also nach unten gekrümmt.

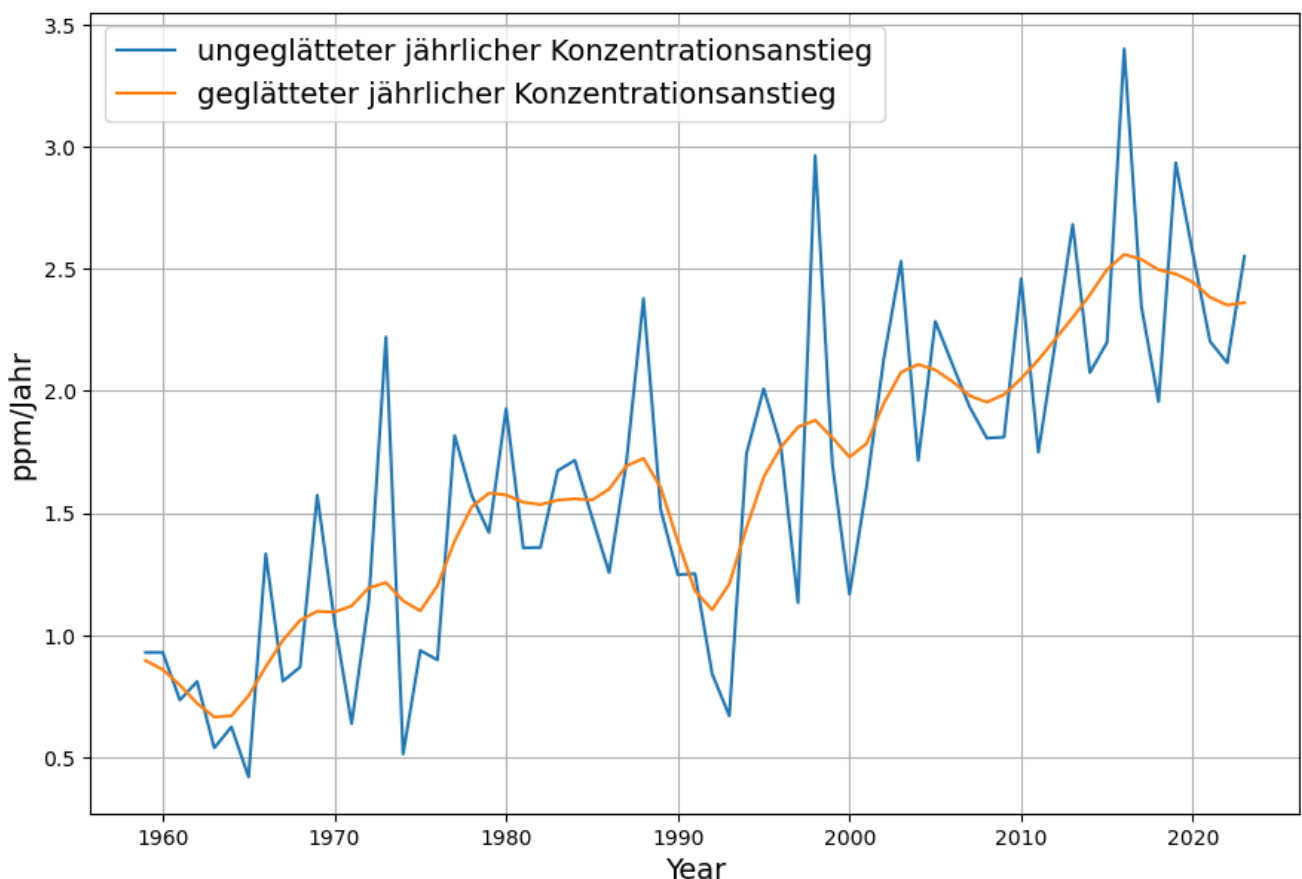
Oder gibt es einen Übergang, also einen Wendepunkt im mathematischen Sinne? Das wäre daran zu erkennen, dass zunächst der jährliche Zuwachs immer größer wird, und ab einem bestimmten Zeitpunkt abnimmt.

Auf den ersten Blick erscheint die Gesamtkurve konkav, was bedeutet dass der jährliche Anstieg der Konzentration mit jedem Jahr augenscheinlich zunimmt.

Die Beantwortung dieser Frage ist entscheidend für die Frage, wie dringend Maßnahmen zur Eindämmung von CO₂ Emissionen sind.

Genauere Untersuchung mit dem gemessenen jährlichen Anstieg

Um einen genaueren Eindruck zu bekommen, berechnen wir den jährlichen Anstieg der CO₂-Konzentration (Stand 2023):



Damit bestätigt sich, dass bis 2016 ein klarer Trend zu immer höherem jährlichen Konzentrationsanstieg bestand, von knapp

0.75 ppm/Jahr im Jahre 1960 bis über 2.5 ppm/Jahr im Jahre 2016.

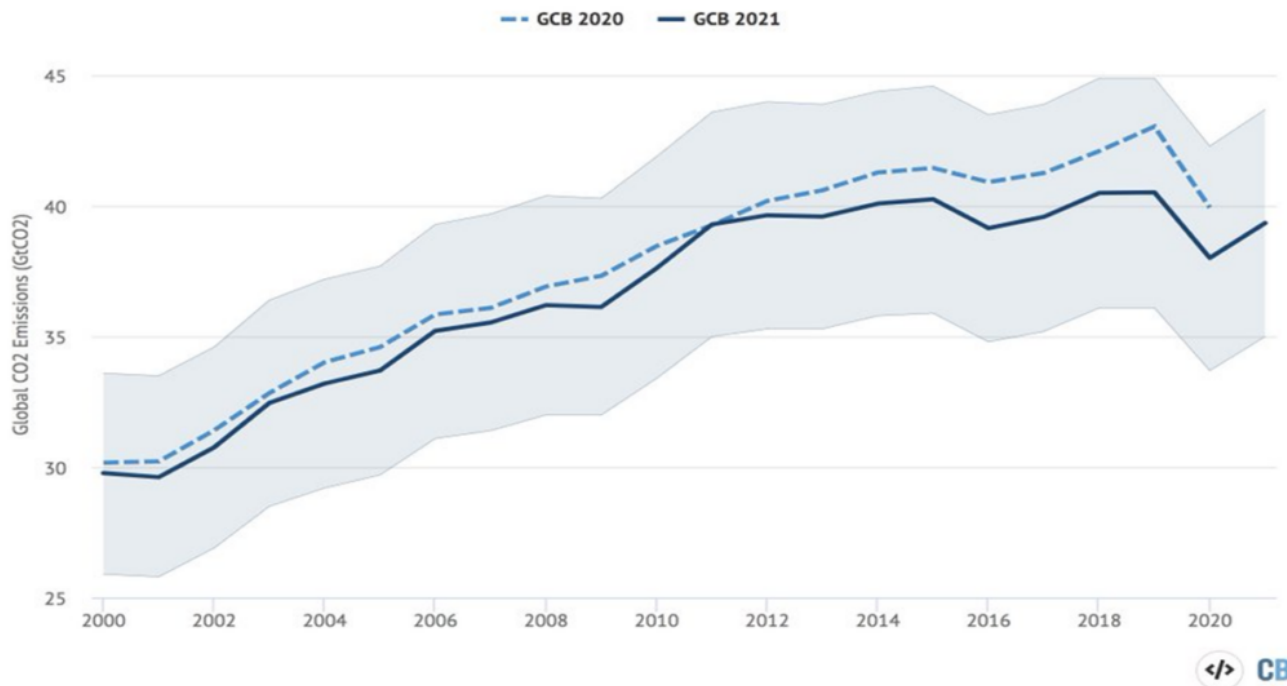
Seit 2016 geht jedoch der jährliche Anstieg zurück. Dabei spielt gewiss der Corona-bedingte Emissionsrückgang eine Rolle, dieser erklärt aber nicht den bereits 2016 einsetzenden Rückgang.

Es gibt also in der Konzentrationskurve im Jahre 2016 einen Wendepunkt, eine Trendumkehr von zunehmendem Konzentrationswachstum zu abnehmendem Konzentrationswachstum. Gibt es dafür eine zufriedenstellende Erklärung? Dies ist wesentlich, denn wenn wir absehen können, dass der Trend zurückgehenden Anwachsens der Konzentration anhält, dann ist absehbar, dass die Konzentration irgendwann nicht mehr weiter ansteigt und das Ziel des Pariser Klimaabkommens, das Gleichgewicht zwischen CO₂-Quellen und CO₂-Senken erreicht werden kann.

Erklärung durch stagnierende Emissionen

Im Rahmen des Global Carbon Brief Projekts hat [Zeke Hausfather 2021 aufgrund neuer Erkenntnisse die Werte der globalen CO₂-Emissionen der letzten 20 Jahre revidiert](#), mit dem wichtigen Ergebnis, dass die globalen Emissionen seit 10 Jahre im Rahmen der Messgenauigkeit konstant sind:

Recent global CO2 emissions revised notably downward



Um die Auswirkungen dieser wichtigen Erkenntnis zu bewerten, muss man den Zusammenhang zwischen Emissionen und CO₂-Konzentration kennen.

Aus meinen eigenen Recherchen dazu [in einer Publikation](#) und [in einem danach mit neuen Erkenntnissen ergänzten Blogbeitrag](#) folgt, dass sich der Konzentrationsanstieg aus den Emissionen und den Absorptionen ergibt, die proportional zur CO₂-Konzentration sind. Dieses Modell wurde in ähnlicher Form auch von anderen beschrieben und publiziert:

- Prof. Vollmer und Prof. Eberhardt [A simple model for the prediction of CO₂ concentrations in the atmosphere, depending on global CO₂ emissions](#)
- Prof. Ganteför [in einem Videovortrag darüber](#),
- Prof. Vahrenholt, in der Publikation [„Oceans' surface pH-value as an example of a reversible natural response to an anthropogenic perturbation“](#),
- Dr. Roy Spencer in der Blog-Publikation [„A Simple Model of the Atmospheric CO₂ Budget“](#),
- Ari Halparin in der Blog-Publikation [„Simple Equation of](#)

Multi-Decadal Atmospheric Carbon Concentration Change„

- Peter Dietze in seinem Beitrag zum 3. IPCC Zustandsbericht ([IPCC's Most Essential Model Errors](http://www.john-daly.com/dietze/cmodcalD.htm)), seinen vorausgegangenen Publikationen, 1995-1998 (verfügbar mit Quellenangaben unter [Little Warming with new Global Carbon Cycle Model](http://www.john-daly.com/dietze/cmodcalD.htm) und [Carbon Model Calculations](http://www.john-daly.com/dietze/cmodcalc.htm) samt Gutachter-Diskussion <http://www.john-daly.com/dietze/cmodcalc.htm>), sowie der neueren der Blog-Publikation „[DECARBONISATION? The fatal error caused by false Carbon Models](http://www.john-daly.com/dietze/cmodcalc.htm)“

Trivialerweise folgt aus der Massenerhaltung, dass die Konzentration C_i am Ende des Jahres i aus der Konzentration des Vorjahres C_{i-1} , den natürlichen Emissionen N_i , den anthropogenen Emissionen E_i und den Absorptionen A_i ergibt:

$$C_i = C_{i-1} + N_i + E_i - A_i$$
 Daraus ergibt sich unmittelbar die aus Emissionen und gemessenem Konzentrationsanstieg berechneten effektive Absorption:

$$A_i - N_i = E_i - (C_i - C_{i-1})$$

Mit der Definition des Konzentrationswachstums

$$G_i = C_i - C_{i-1}$$

ergibt sich, dass die gesamte Senkenwirkung sich zwingend aus der Differenz der Emissionen und dem Konzentrationswachstum ergibt – ohne dass man wissen muss, wie diese Senkenwirkung im Detail zustande kommt. Dabei hat diese Gesamtsenkenwirkung zwei Komponenten, und zwar die Jahressumme aller Absorptionen, die zu A_i zusammengefaßt werden, und die als N_i zusammengefaßten sog. „natürlichen Emissionen“, das ist die Jahressumme sämtlicher Emissionen außer den anthropogenen, die separat als E_I geführt werden:

$$\begin{equation}\label{absorption_measurement}A_i - N_i = E_i - G_i \end{equation}$$

Unter der Annahme konstanter jährlicher natürlicher Emissionen
 $N_i = n$

und der linearen Modellannahme, also dass die Absorptionen proportional zur Konzentration des Vorjahres sind,

$$A_i = a \cdot C_{i-1}$$

wird das Absorptionsmodell als lineares Modell der Konzentration erstellt (diese beiden Annahmen werden ausführlich in der Publikation begründet):

$$\begin{equation}\label{absorption_equ}E_i - G_i = a \cdot C_{i-1} - n \end{equation}$$

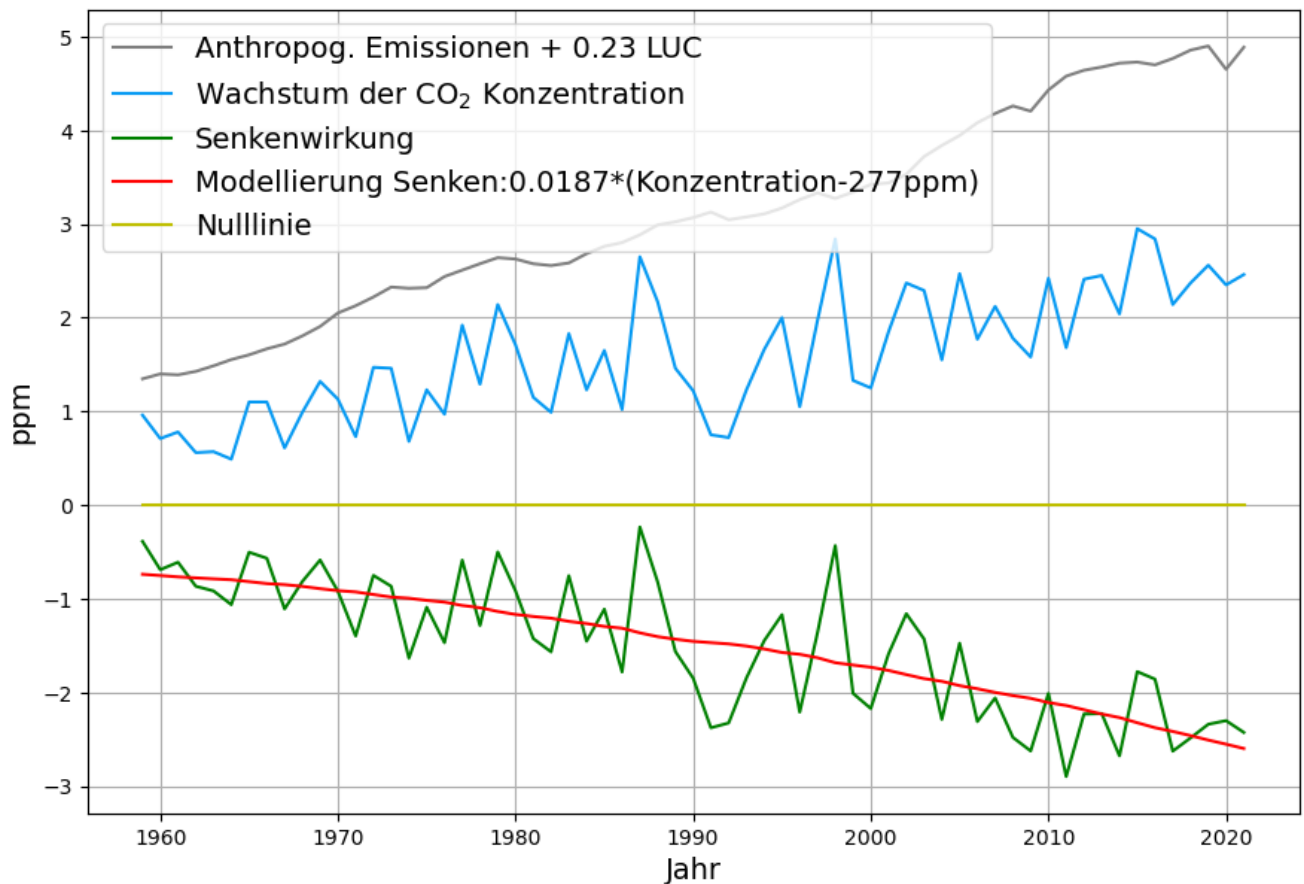
Mit $n = a \cdot C_0$ lässt sich die Modellgleichung umformulieren, es ergibt sich damit die Gleichgewichtskonzentration C_0 für den Fall von Nullemissionen, also die vorindustrielle Gleichgewichtskonzentration :

$$\begin{equation}\label{absorption_equ}E_i - G_i = a \cdot (C_{i-1} - C_0) \end{equation}$$

Die Regressionsrechnung dieses Gleichungssystems [mit den aktuellen CO₂ Emissionsdaten](#) (Selektion country = World) liefert das Ergebnis $a=0.0187$ und $C_0 = 277$ ppm. Bei dieser Berechnung werden die Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen nur anteilig (23%) berücksichtigt. Dies erklärt die zahlenmäßigen Unterschiede des Ergebnisses mit denen der zitierten Publikationen. Das geringe Wichtung der Landnutzungsänderungen ist gerechtfertigt:

- Alle Quellen stimmen darin überein, dass die veröffentlichten Werte der Emissionen durch Landnutzungsänderung stark fehlerbehaftet sind,
- Mit der Wichtung der Emissionen durch Landnutzungsänderungen von etwa 25% führt das Modell zu einer Gleichgewichtskonzentration C_0 , die der

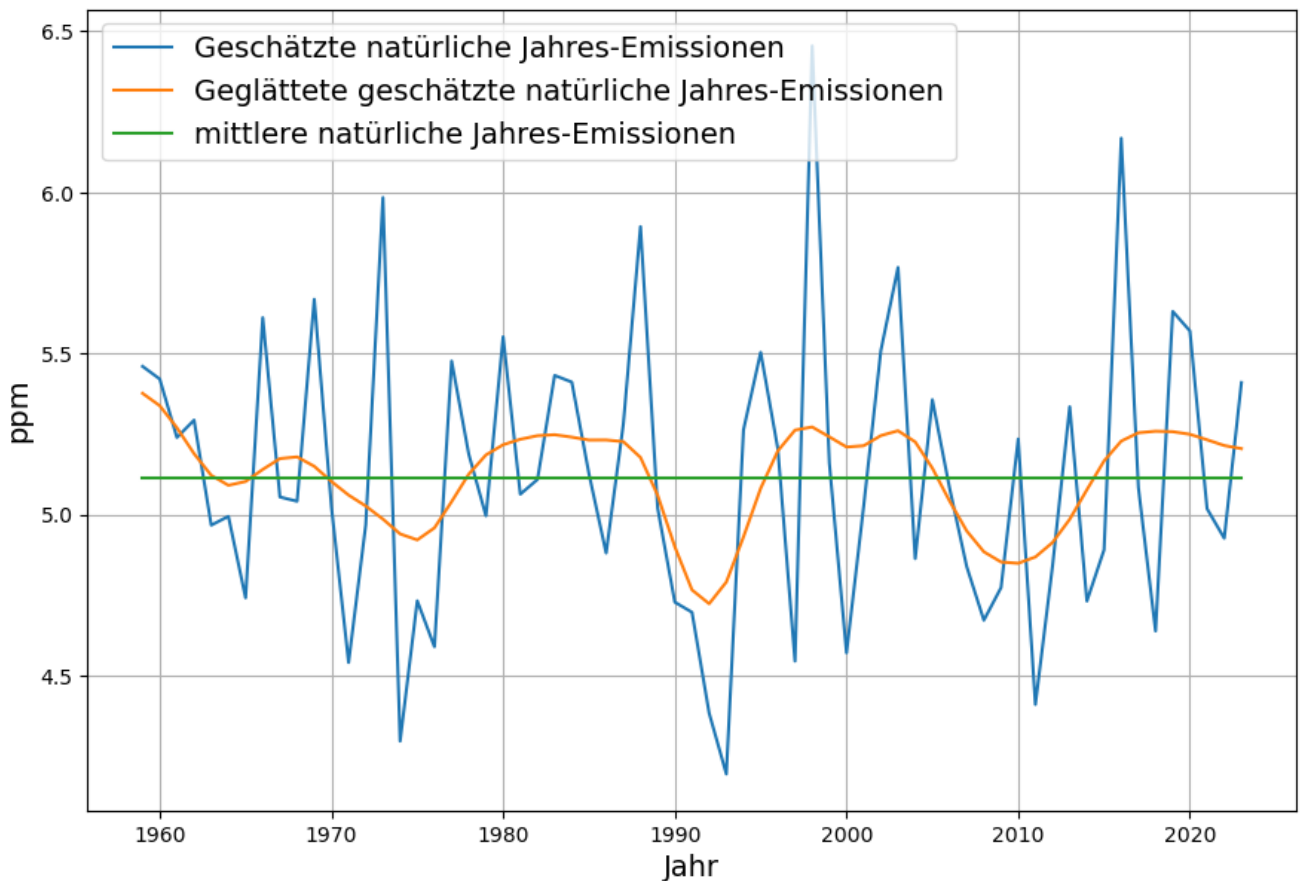
vorindustriellen Gleichgewichtskonzentration von etwa 280 ppm entspricht.



Mit

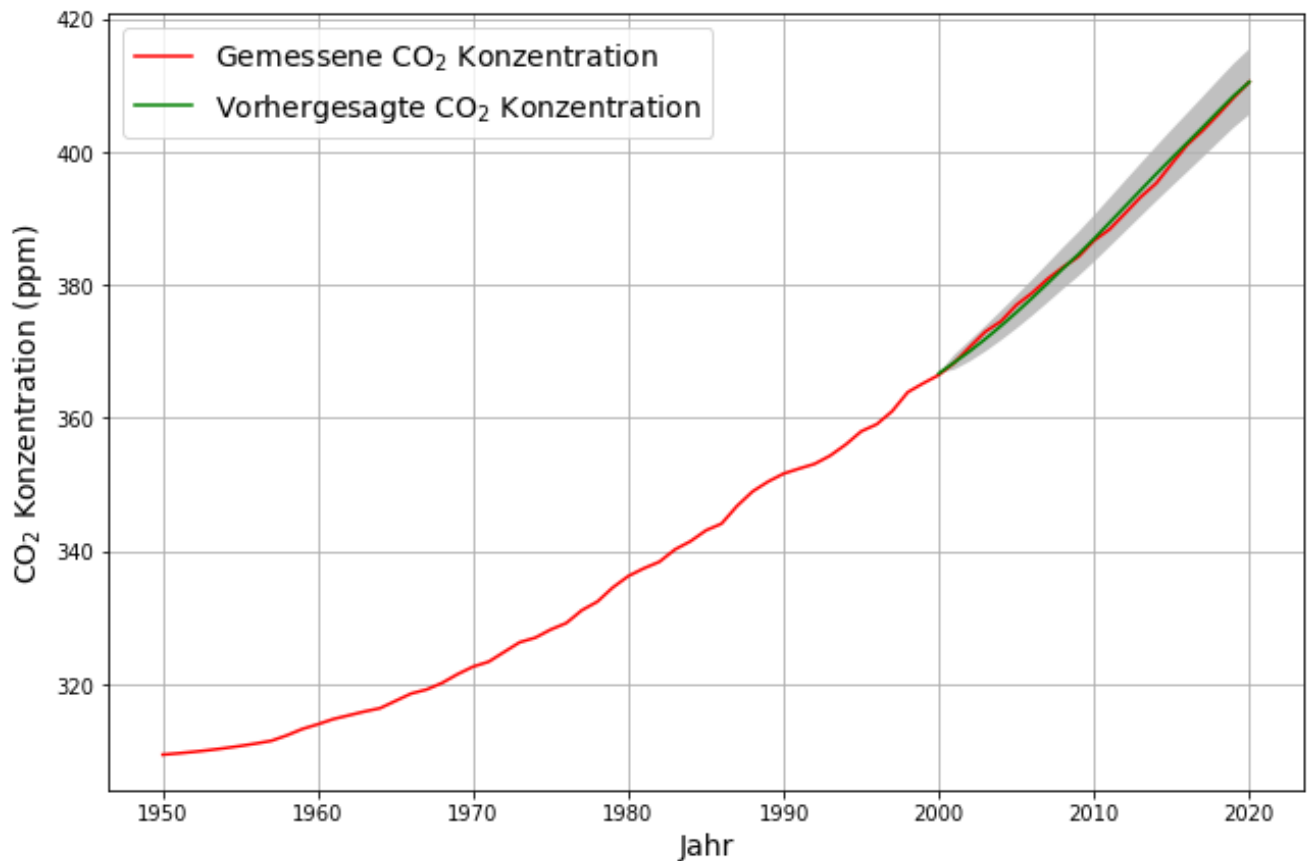
$$N_i = G_i - E_i + a \cdot C_{i-1}$$

können aus der modellierten Absorption die variablen jährlichen natürlichen Nettoemissionen N_i ermittelt werden. Deren Mittelwert ist die Konstante n .



Daraus ist erkennbar, dass die residualen natürlichen Emissionen eine zyklische Komponenten enthalten, die mit dem El Nino und kontingenten Ereignissen wie dem Ausbruch des Pinatubo zusammenhängt.

Mit diesem Modell wird die bekannte Konzentration zwischen 2000 und 2020 aus den Daten zwischen 1950-2000 sehr genau prognostiziert. Da das Modell zwar einen linearen Trend, aber keine zyklischen Schwankungen vorsieht – diese landen alle in der Variabilität der natürlichen Emissionen –, zeigt auch die modellierte Konzentration keine zyklischen Schwankungen:

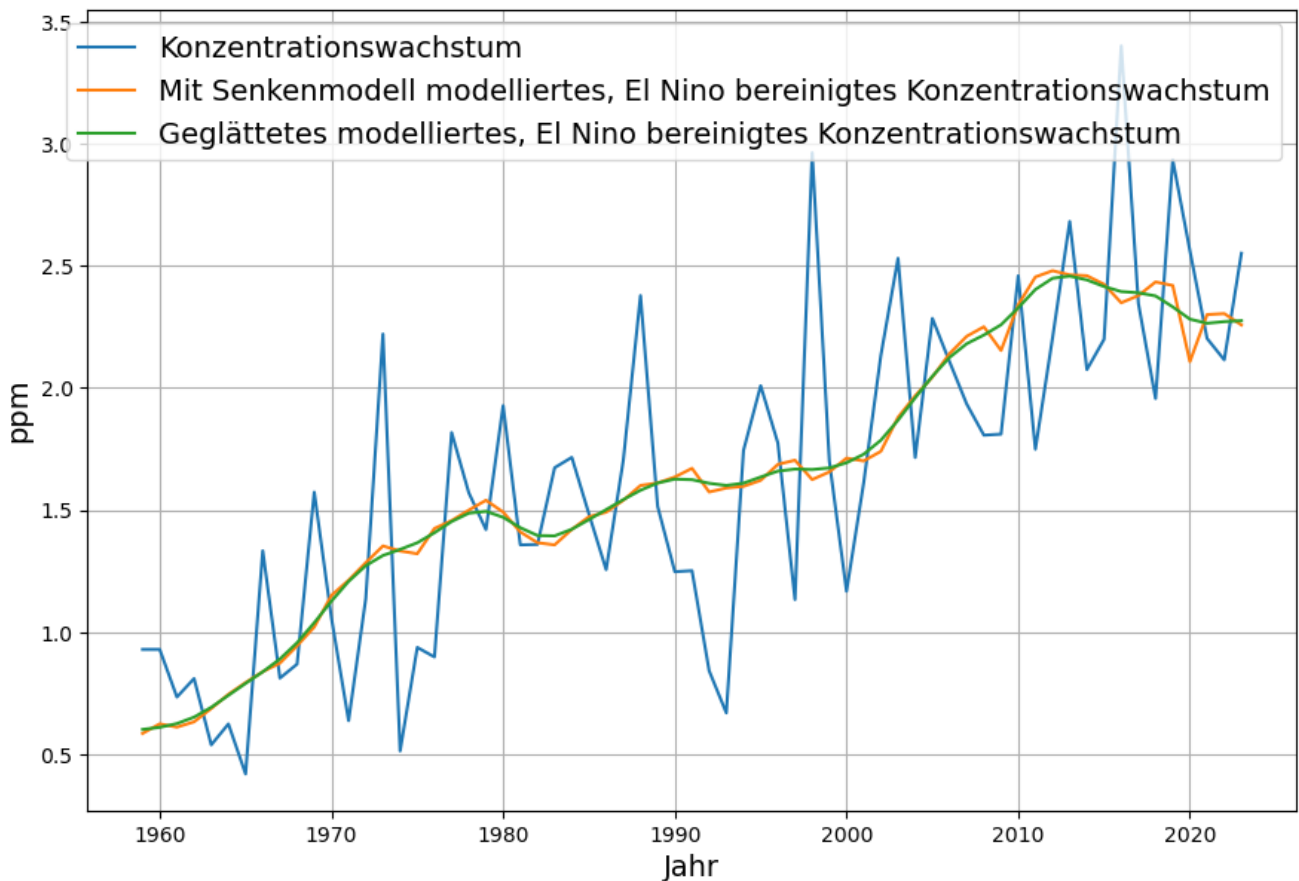


Wachstumsrate der modellierten Konzentration

Die Wachstumsrate der modellierten Konzentration G^{model}_i ergibt sich durch Umstellung der Modellgleichung:

$$G^{\text{model}}_i = E_i - a \cdot C_{i-1} + n$$

Diese zeigt nun auch nicht mehr die zyklischen Schwankungen:



Es bleibt nach wie vor ein globales Maximum, das Jahr des Maximums ist allerdings von 2016 nach 2013 gewandert. Diese El Nino bereinigte Konzentrationsänderungen bestätigen die Aussage von Zeke Hausfather, dass in der Tat die Emissionen bereits seit 10 Jahre konstant sind.

Entwicklung der CO₂-Konzentration bei konstanten Emissionen

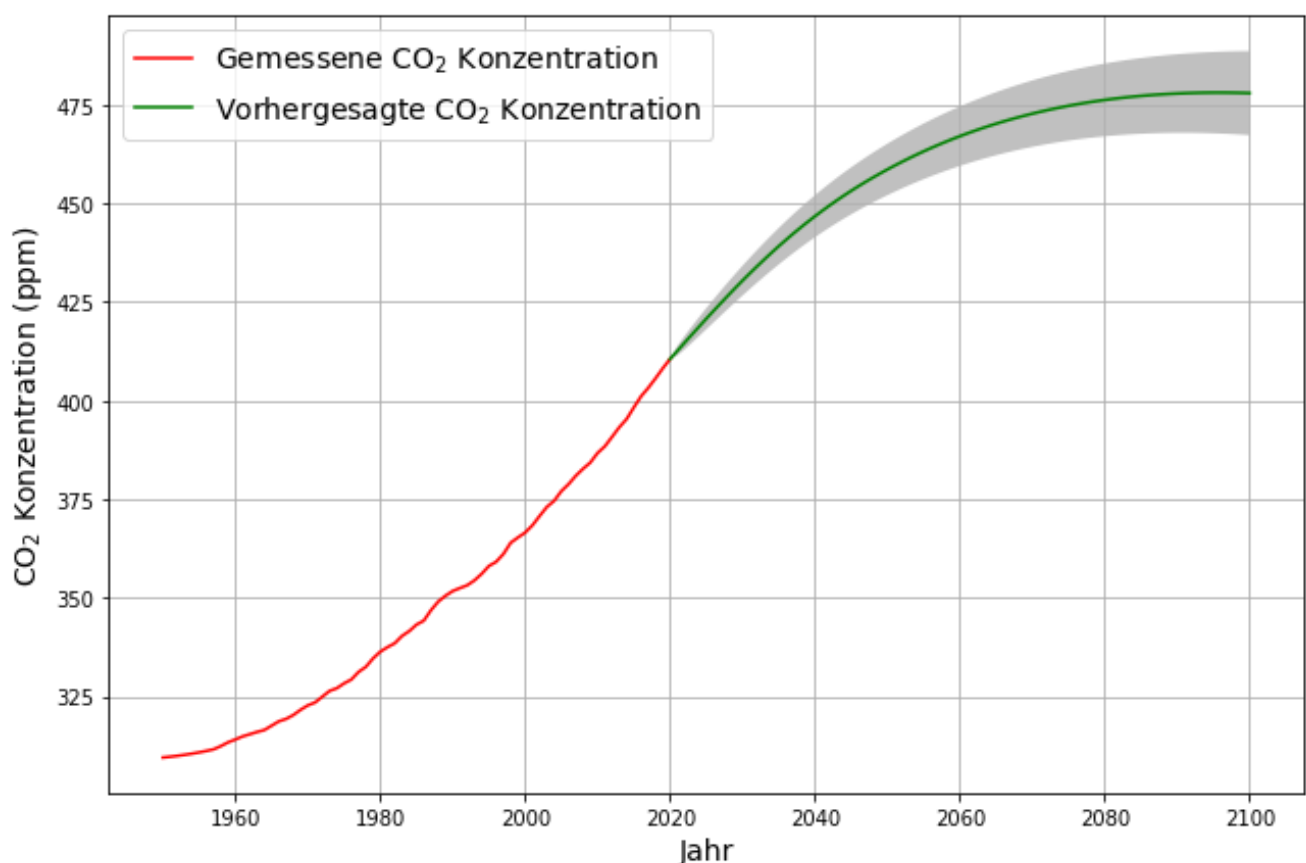
Um den Wendepunkt der CO₂-Konzentration zu verstehen, wollen wir mit der Annahme konstanter Emissionen $E_i = E$ und den Gleichungen (\ref{absorption_measurement}) und (\ref{absorption_equ}) den prognostizierten Verlauf berechnen:

$$\begin{equation}\label{const_E_equ}C_i - C_{i-1} = E - a \cdot (C_{i-1} - C_0)\end{equation}$$

Die linke Seite beschreibt den Anstieg der Konzentration. Auf der rechten Seite wird von den konstanten Emissionen E ein mit wachsender Konzentration C_{i-1} wachsender Betrag abgezogen, demnach nimmt der Konzentrationszuwachs mit

wachsender Konzentration ab. [Dies kann mit einem speziellen Bankkonto veranschaulicht werden](#). Sobald die Konzentration den Wert $\frac{E}{a} + C_0$ erreicht, ist der Gleichgewichtszustand erreicht, bei dem die Konzentration nicht mehr weiter anwächst, also die oft verwendete „Netto-Null“ Situation.

Mit den aktuellen Emissionen von 4.7 ppm wäre „Netto-Null“ bei 515 ppm, während sich beim „Stated-Policies“ Emissionsszenario der Internationalen Energieagentur (IEA), das eine leichte Reduktion von 3% pro Dekade in der Zukunft vorsieht, ein Gleichgewicht bei 475 ppm einstellt, wie in der obigen Publikation beschrieben. [Mit den Prognosedaten der IEA wird dies voraussichtlich 2080 der Fall sein:](#)



Demnach sind konstante Emissionen eine hinreichende Begründung für einen konvexen Verlauf der CO₂-Konzentration, wie wir ihn seit 2016 vorfinden. Gleichzeitig wird damit belegt, dass CO₂-Absorptionen in der Tat mit zunehmender Konzentration zunehmen.

Häufig gestellte Fragen zur CO₂-Sensitivität

Welche Rolle spielt der Wasserdampf bei der CO₂-Sensitivität, wirkt er nicht als Treibhausverstärker?

Es geht dabei im Wesentlichen um die Frage, ob durch Wasserdampf eher eine positive Rückkopplung des CO₂-bedingten Treibhauseffektes erfolgt (wie z.B. von Vertretern des PIK behauptet) oder eher eine negative, [wie von Prof. Richard Lindzen beschrieben](#).

Hierzu betrachten wir zwei in diesem Zusammenhang wichtige, unbestrittene Fakten.

Das globale Energiebudget

Diejenigen, die behaupten, dass der Wasserdampf den Treibhauseffekt verstärke, berufen sich darauf dass bei steigender Temperatur die Luft gemäß der Clausius-Clapeyron-Gleichung mehr Wasserdampf aufnehmen könne, was zu einem stärkeren Treibhauseffekt führt und damit zu einer positiven Rückkopplung. Der treibhausverstärkende Gesamteffekt des Wasserdampfes ist [im globalen Energiebudget](#) mit etwa 26,6W/qm berücksichtigt:

Box 1 | Updated energy balance

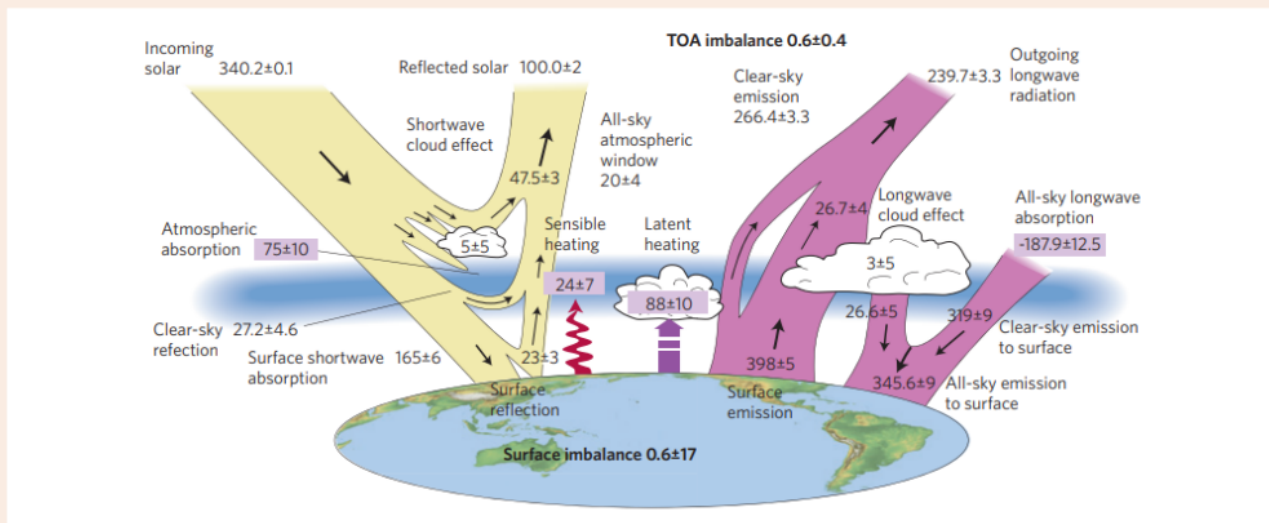
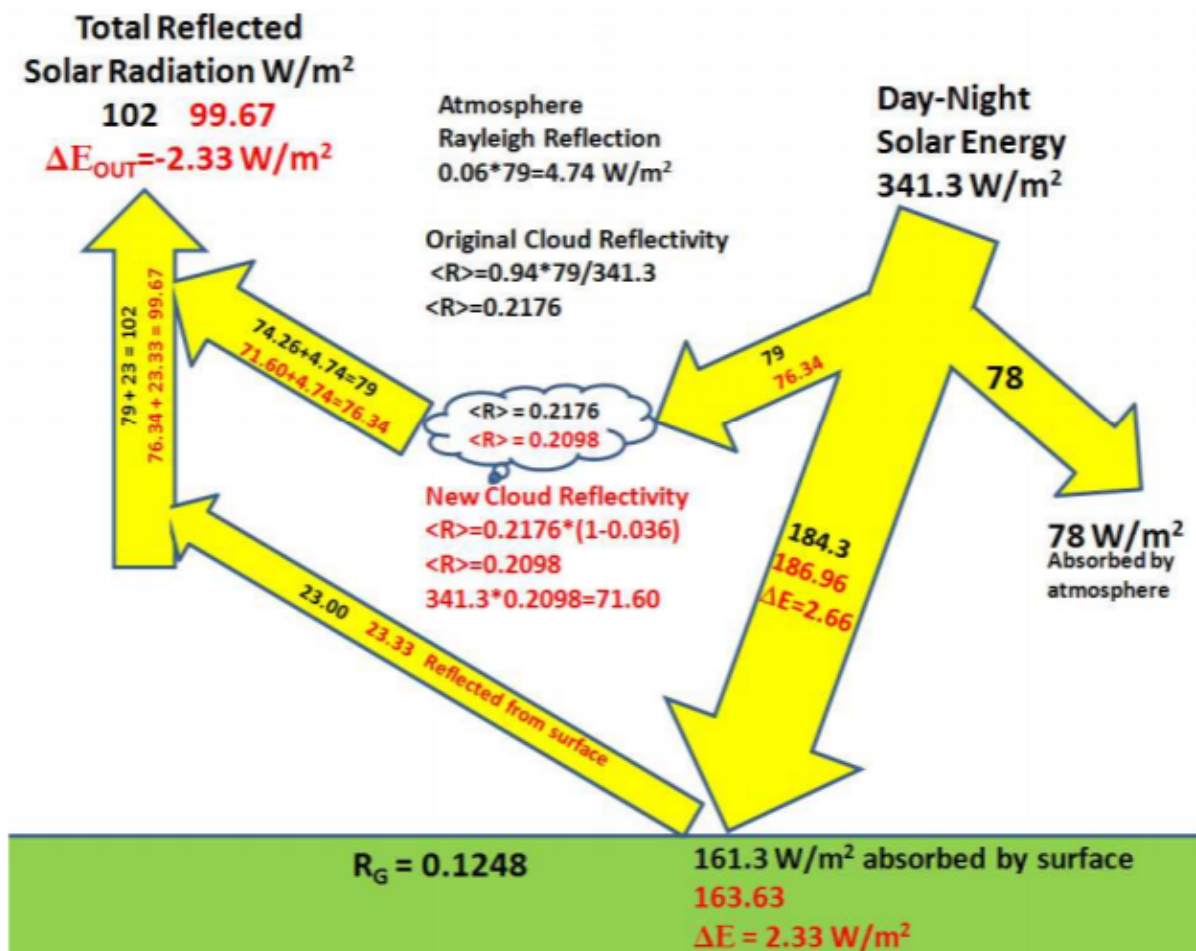


Figure B1 | The global annual mean energy budget of Earth for the approximate period 2000–2010. All fluxes are in Wm^{-2} . Solar fluxes are in yellow and infrared fluxes in pink. The four flux quantities in purple-shaded boxes represent the principal components of the atmospheric energy balance.

Ebenso bekannt wie unstrittig ist die Bildung von Wolken aus Wasserdampf. Und die meisten Wolken haben die Eigenschaft, dass sie Licht reflektieren. Demzufolge kommt aufgrund der Wolkenalbedo nur ein Teil der kurzwelligeren Sonnenenergie bei der Erde an. Der Energieverlust aufgrund der Wolkenreflexion ist im Energiebudget mit etwa $-47,5 \text{ W/qm}$ berücksichtigt. Demzufolge ist die Abkühlung aufgrund der Wolkenbildung global gesehen um mehr als 20 W/qm größer als deren Treibhauswirkung. Die Gesamtwirkung aller Wolken bildet demnach eine sehr starke negative Rückkopplung beim Treibhauseffekt. Wo ist die Evidenz, dass bei marginalen Veränderung der Wolkenbedeckung sich dieser Effekt umkehrt?

Die energetischen Auswirkungen des Rückgangs der Wolkenbedeckung über 30 Jahre

Als wahrscheinlich erste von mittlerweile vielen Arbeiten zur Untersuchung der Albedoveränderung wurde im Artikel [Nettoabnahme des Reflexionsvermögens der Wolken, der Aerosole und der Erdoberfläche bei 340 nm Wellenlänge](#) nachgewiesen, dass über einen Zeitraum von 33 Jahren aufgrund der Abnahme der Wolkenbildung und demzufolge Abnahme der Reflexivität der Atmosphäre der Energiezufluß um $2,33 \text{ W/qm}$ zugenommen hat:



Dies wirft nicht nur die Frage auf, warum ein 4-fach größerer Effekt als die Treibhauswirkung des CO₂ bislang in den Klimamodellen nicht berücksichtigt wird, es zeigt zweifelsfrei, dass nur eine Abnahme der globalen Bewölkung zu einer Temperaturzunahme führt. Eine Bewölkungszunahme würde demzufolge zu einer Temperaturabnahme führen.

Demzufolge wäre eine positive Wasserdampf-Rückkopplung nur möglich, wenn nachgewiesen werden kann, dass **global gesehen** ein erhöhte Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre zu einer verringerten Wolkenbildung führt. Viel Spaß bei diesem Ansinnen.

Wohlgemerkt, es hilft nicht, irgend einen Einzeleffekt zu finden (wie z.B. stratosphärische Cirruswolken), bei dem nur ein Treibhauseffekt stattfindet, aber keine Reflexionsreduktion, es muß schon nachgewiesen werden, dass der Effekt für den globalen Erwartungswert gilt.

Wir können weiterleben – ohne Sorgen wegen CO₂

Sie glauben das nicht? Wo uns doch täglich Medien und Politik einhämmern, dass es gar keine Emissionen mehr geben darf, um das berühmte Netto Null zu erreichen?

Es hilft uns weiter, erst einmal den Originaltext des Pariser Klimaabkommens zu lesen:

- *Die Länder müssen das **Emissionsmaximum** so bald wie **möglich** erreichen, um*
- *ein **Gleichgewicht** zwischen vom Menschen verursachten **Emissionen** durch Quellen und **Absorptionen** durch Senken von Treibhausgasen in der 2. Hälfte des Jahrhunderts zu erreichen (bei einer Temperaturerhöhung um max. 1.5° C)*

Im Klartext heißt also Netto-Null, dass die Quellen von Emissionen mit den Absorptions-Senken im Gleichgewicht sein müssen. Es heißt nicht, dass die Emissionen Null sein müssen, es heißt nur, dass es gleich viele Absorptionen wie Emissionen gibt.

Die Klimawissenschaft befasst sich in der Regel mit der Frage „Wie viel CO₂ verbleibt in der Atmosphäre?“, angesichts der anthropogenen Emissionen und der begrenzten Fähigkeit der Ozeane und der Biosphäre, die überschüssige CO₂ Konzentration aufzunehmen. Die Analyse der einzelnen Mechanismen hat zusammen mit der mittlerweile falschen Annahme exponentiell wachsender Emissionen zu Schlussfolgerungen der Art geführt, dass ein bestimmter zunehmender Anteil der anthropogenen Emissionen für immer in der Atmosphäre verbleibt.

Zu einer anderen Schlussfolgerung kommen wir jedoch, wenn wir die logisch gleichwertige Frage stellen: „Wie viel CO₂ verbleibt nicht in der Atmosphäre?“. Das verändert alles. Die Menge an CO₂, die nicht in der Atmosphäre verbleibt, kann anhand der direkten Messungen von Emissionen und Konzentrationsänderungen berechnet werden, ohne dass wir die Absorptionsmechanismen im Einzelnen untersuchen müssen. Denn für das CO₂ gilt die Massenbilanzgleichung, die besagt, dass nichts verloren geht:

Konzentrationsänderung = Emissionen – Absorptionen

Dass bereits heute mehr als die Hälfte der menschengemachten Emissionen von den Ozeanen und der Photosynthese der Pflanzen und in der Folge auch von Tieren wieder geschluckt werden, ist allgemein bekannt und unstrittig, aber viele befürchten, dass ein Rest für immer in der Atmosphäre verbliebe.

Das trifft so nicht zu: [In einer wissenschaftlichen Publikation](#) und [in einem leichter verständlichen Blogbeitrag](#) wird mit den Messdaten der letzten 70 Jahre nachgewiesen, dass jedes Jahr etwa 2% der über 280 ppm hinausgehenden CO₂-Konzentration von den Ozeanen und den Pflanzen der Atmosphäre wieder entzogen werden.

Diese 280 ppm ergeben sich aus dem Gleichgewicht aus natürlichen Emissionen und Absorptionen ohne anthropogene Emissionen.

Die Messdaten, insbesondere die der CO₂-Konzentration, sind seit den 50er Jahren sehr genau. Mit den Messwerten von 1950-2000 konnten die tatsächlichen CO₂-Konzentrationen von 2000-2020 exakt vorhergesagt werden, wie wir rückblickend sehen können. Die Qualität der Vorhersage ist ganz hervorragend.

Um zu verstehen, wie der Mechanismus der Emission (die Quellen) und Absorption (die Senken) funktioniert, schauen wir

uns einen Vergleich aus der vertrauteren Welt eines Geldkontos an.

Das Gleichnis eines speziellen Geldkontos

Stellen Sie sich vor, Sie haben ein Konto mit einem Kontostand von 413 € zu Beginn des Jahres 2020. In dieses Konto werden jedes Jahr 4,50 € einbezahlt.

Nun hat sich der Staat eine eigenartige Vermögenssteuer für dieses Geldkontos einfallen lassen: Es gibt einen Freibetrag von 280 €. Der Rest des Guthabens auf dem Konto wird am Jahresende mit 2% besteuert.

Was passiert? Wie entwickelt sich der Kontostand? Am Ende des Jahres 2020 sind 417,50 € auf dem Konto, davon werden $0,02 \cdot (417,50 - 280) = 2,75$ abgeführt, es verbleiben also 414,75 €

Jahr	Am 1.1.	Einzahlung	Besteuerung	Abzug	Am 31.12.
2020	413,00	4,50	$0,02 \cdot (417,50 - 280,00)$	2,75	414,75
2021	414,75	4,50	$0,02 \cdot (419,25 - 280,00)$	2,78	416,46
2022	416,46	4,50	$0,02 \cdot (420,96 - 280,00)$	2,82	418,15
...					
2050	452,77	4,50	$0,02 \cdot (457,27 - 280,00)$	3,55	453,72
...					
2080	474,46	4,50	$0,02 \cdot (478,96 - 280,00)$	3,98	474,98

Man sieht, der Kontostand wächst zwar an, aber die Abzüge erhöhen sich jedes Jahr. Man kann leicht ausrechnen, dass bei einem Kontostand von 505 € am Jahresende die ganzen einbezahlten 4,50 € wieder abgeführt werden. Das heißt, beim Kontostand 505 € ist die berühmte Netto-Null Situation erreicht. Weiter kann das Konto bei jährlichen 4,50 € Einzahlungen nicht mehr anwachsen. Und es dauert ziemlich lange, bis dieser Zustand erreicht ist: Nach 60 Jahren wäre man erst bei 474,98 €.

Zukunftsszenario

Dieses Geldkonto-Gleichnis beschreibt ziemlich genau den CO₂-Haushalt der Atmosphäre. Der Kontostand entspricht der Konzentration des CO₂ in der Atmosphäre, zu Beginn des Jahres 2020 waren das etwa 413 ppm („parts per million“ = Anteile CO₂ pro 1 Million Luftmoleküle).

Die Einzahlungen entsprechen den jährlichen weltweiten Emissionen, also das, was wir in die Atmosphäre hineingeben. Das sind aktuell etwa 4,5 ppm weltweit, was einem Gewicht von etwa 36 Milliarden Tonnen CO₂ entspricht.

Nun hat die Internationale Energieagentur mit ihrer weltweiten Statistik seit 1850 geschätzt, wieviel CO₂ in Zukunft ausgestoßen werden wird. Dabei gibt es ein Szenario, bei dem angenommen wird, dass die jetzt grade geltenden Gesetze und Regelungen in allen Ländern der Erde unverändert weiter fortgesetzt werden, das sogenannte „[Szenario der ergriffenen Maßnahmen](#)“. Also möglicherweise existierende emissionssenkende Gesetze, aber keine künftigen weiteren Maßnahmen zur Emissions-Senkung.

Dieses Szenario besagt, dass die weltweiten Emissionen über die nächsten 10 Jahre etwa gleichbleiben, und dann ganz leicht mit etwa 0,3% pro Jahr sinken. Das bedeutet, dass es weltweit im Jahre 2100 wieder genauso viele Emissionen geben wird wie im Jahre 2005. Das kann bei einzelnen Ländern schon dazu führen, dass die Emissionen etwas stärker sinken, dagegen in den ärmsten Entwicklungsländern aufgrund des Nachholbedarfs Emissionen erst noch anwachsen. Aber es wird nirgendwo dramatische Auswirkungen geben, die den Wohlstand in Frage stellen.

Mit den Zahlen der Internationalen Energie Agentur haben wir herausgefunden: Der CO₂-„Kontostand“ beträgt im Jahre 2080 etwa 475 ppm, und wird darüber hinaus nicht mehr ansteigen. Sensationelles Ergebnis.

Und was heißt das für das Klima?

Wir wollen uns hier ganz bewusst nicht auf die möglicherweise berechtigten Zweifel einlassen, ob nun das CO₂ überhaupt einen Einfluss auf die globale Mitteltemperatur und in der Folge auf das Klima hat oder nicht. Unbestritten ist seit dem Beginn der Industrialisierung die CO₂ Konzentration von 280 auf 413 ppm angewachsen, also um 133 ppm.

Wir akzeptieren hier die weit verbreitete Auffassung, dass der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um 1° C seit dem Beginn der Industrialisierung ausschließlich diesem Anwachsen der CO₂ Konzentration geschuldet ist.

Der künftige Anstieg der CO₂-Konzentration ist $475 - 413 = 62$ ppm. Das ist knapp die Hälfte des bisherigen Anstiegs von 133 ppm. Damit geht konsequenterweise einher, dass bis dann auch die Temperatur allenfalls nochmal um ein halbes Grad ansteigt, also insgesamt um 1,5° seit Beginn der Industrialisierung.

Die gute Nachricht: Mit den heutigen CO₂ -Emissionen und deren Senkung durch Effizienzsteigerung von 3% pro Jahrzehnt wird das optimistische Pariser Klimaziel von 1,5° bei Netto Null erfüllt, ganz ohne wohlstandsschädigende Maßnahmen ergreifen zu müssen.

**Emissionen und CO₂
Konzentration – ein
evidenzbasierter Ansatz**

Eine neue Sichtweise auf das Problem

Die Klimawissenschaft befasst sich in der Regel mit der Frage „Wie viel CO₂ verbleibt in der Atmosphäre?“, angesichts der anthropogenen Emissionen und der begrenzten Fähigkeit der Ozeane und der Biosphäre, die überschüssige CO₂ Konzentration aufzunehmen. Dies hat zu Schlussfolgerungen der Art geführt, dass ein bestimmter zunehmender Anteil der anthropogenen Emissionen werden für immer in der Atmosphäre verbleibt.

Wir ändern den Fokus der Aufmerksamkeit, indem wir die logisch äquivalente Frage „Wie viel CO₂ verbleibt nicht in der Atmosphäre?“ stellen. Warum ist das so anders? Die Menge an CO₂, die nicht in der Atmosphäre verbleibt, kann anhand direkter Messungen berechnet werden. Wir müssen nicht jeden einzelnen Absorptionsmechanismus aus der Atmosphäre in die Ozeane oder Pflanzen analysieren. Aus den bekannten globalen Konzentrationsänderungen und den bekannten globalen Emissionen können wir die Summe der tatsächlichen jährlichen Absorption gut abschätzen. Diese sind mit der CO₂ -Konzentration verbunden, was die Leithypothese eines linearen Absorptionsmodells begründet. Es stellt sich heraus, dass wir die tatsächlichen Koeffizienten der einzelnen Absorptionsmechanismen nicht zu kennen brauchen – es reicht aus, ihre lineare Abhängigkeit von der aktuellen CO₂ Konzentration anzunehmen.

Dies ist eine Zusammenfassung [eines kürzlich veröffentlichten Artikels](#), in dem alle Aussagen detailliert abgeleitet und mit Referenzen und einem mathematischen Modell untermauert werden. Im Unterschied zu dem Artikel wird in dieser Kurzfassung der Einfluß der mit großen Unsicherheiten behafteten Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderung weggelassen, weil

1. es legitim ist, die ohnehin mit großen Unsicherheiten behafteten Landnutzungsemissionen den unbekannten natürlichen Emissionen zuzuschlagen

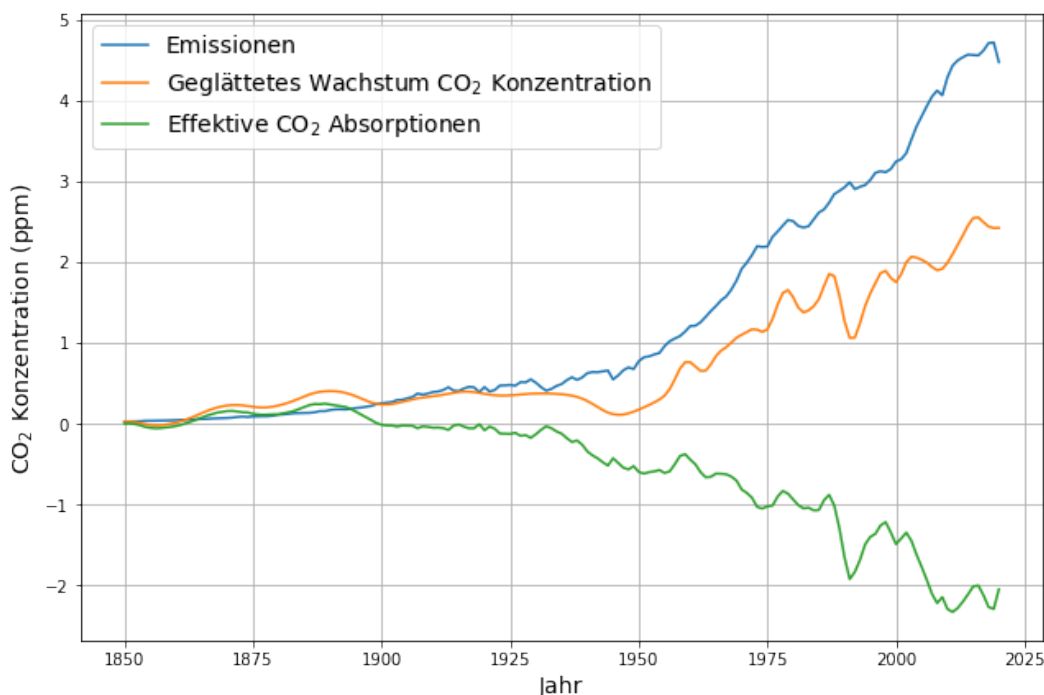
2. sich der statistische Fehler des Ergebnisses bei Weglassen der aufgrund der Unsicherheit ziemlich willkürlichen Landnutzungsänderung verringert, was zu höherer Prognosequalität führt.

Massenerhaltung von CO₂

Wie bei der Jahresbilanz eines Bankkontos ergibt sich die atmosphärische CO₂-Bilanz aus den Gesamtemissionen abzüglich der Gesamtaborption:

$$\text{Konzentrationswachstum} = \text{Emissionen} - \text{Absorptionen}$$

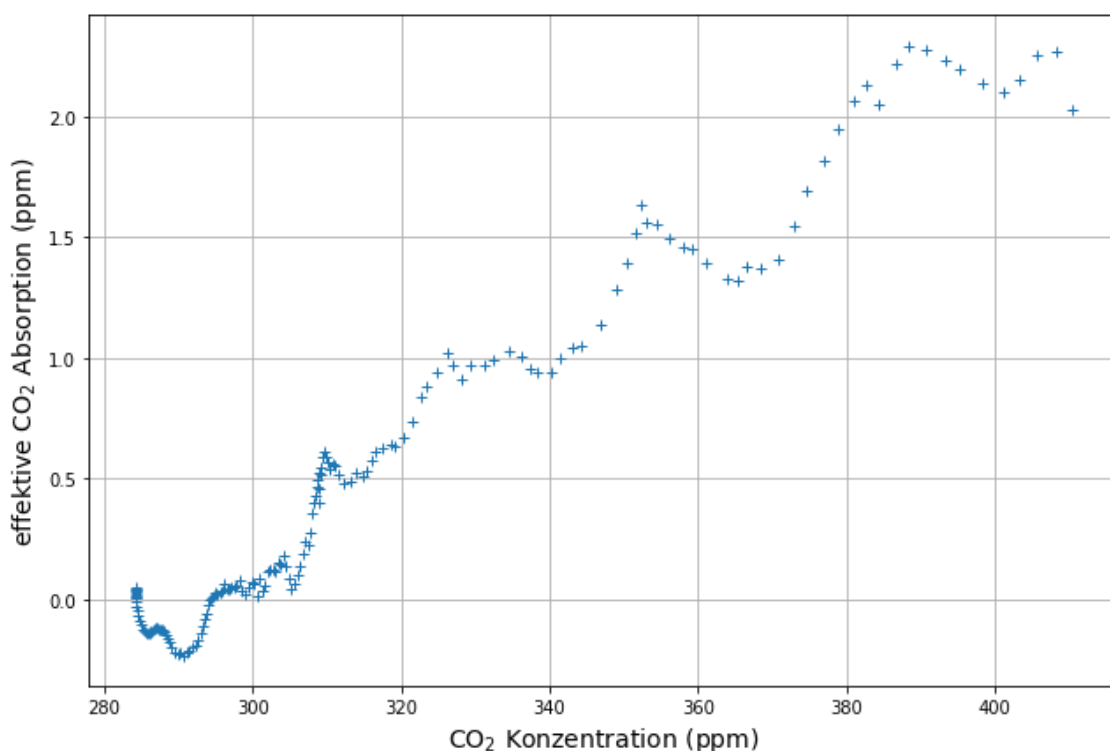
Der jährliche Anstieg der CO₂-Konzentration (orange) wächst im Schnitt langsamer die gesamten anthropogenen Emissionen (blau), was bedeutet, dass die daraus berechnete Netto Absorption (grün) mit der steigenden CO₂-Konzentration tendenziell zunimmt:



Wichtig ist hierbei zu bemerken, dass alle natürlichen Emissionen und Absorptionen, die innerhalb der Messintervalle (hier je 1 Jahr) geschehen und sich im langjährigen Gleichgewicht befinden, „unsichtbar“ sind.

Die Annahme einer annähernden Linearität der relevanten Absorptionsprozesse

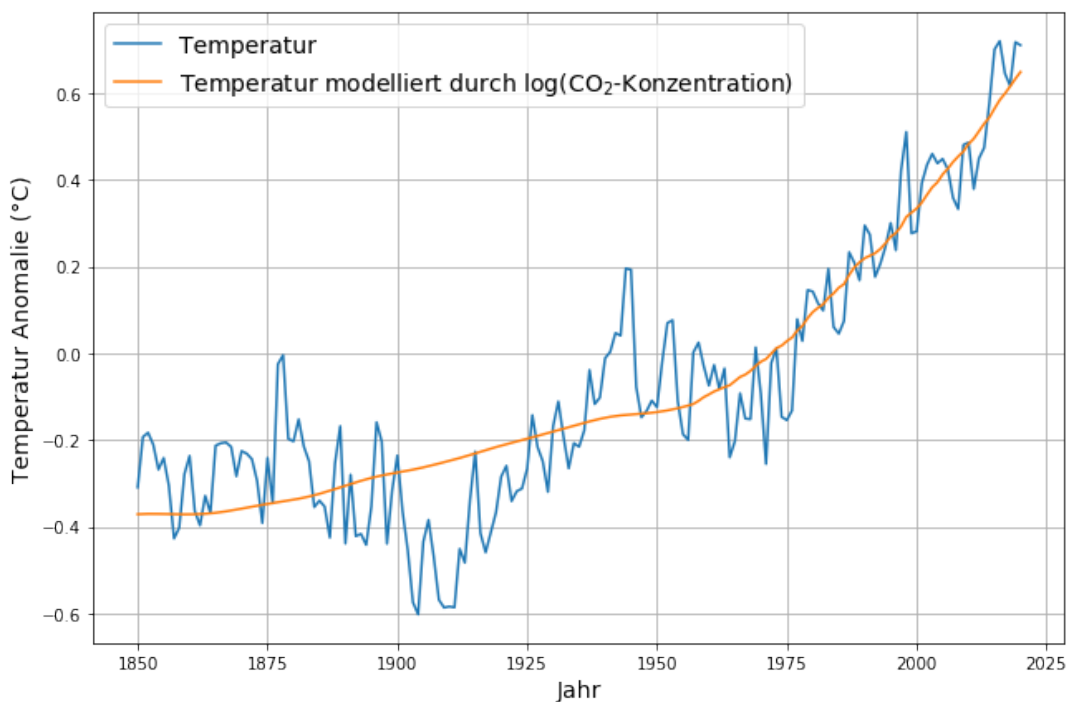
Dies wird durch ein Streudiagramm veranschaulicht, das die effektive CO_2 -Absorption mit der CO_2 -Konzentration in Beziehung setzt. Physikalischer Hintergrund dieser Darstellung ist, dass alle Diffusions- und Absorptionsprozesse mit der Konzentration linear skalieren, ebenso die Aufnahme von CO_2 bei der Photosynthese (C_4 -Pflanzen haben ein Plateau mit geringem aber trotzdem linearen Anstieg im Konzentrationsbereich 280..600 ppm).



Es legt eine langfristige lineare Abhängigkeit der effektiven Absorption von der atmosphärischen CO_2 -Konzentration mit erheblichen kurzfristigen Abweichungen nahe, wobei die effektive Null-Absorptionslinie bei ca. 280 ppm geschnitten wird. Dies wird als die vorindustrielle CO_2 -Gleichgewichtskonzentration angesehen, bei der die natürlichen jährlichen Emissionen durch die jährlichen Absorptionen ausgeglichen sind. Die durchschnittliche jährliche Absorption beträgt etwa 2 % der CO_2 -Konzentration, die 280 ppm überschreitet.

CO₂ Konzentration als Proxy für die Temperatur

Wenn wir Vorhersagen mit hypothetischen zukünftigen CO₂-Emissionen machen, kennen wir die zukünftigen Temperaturen nicht. Ohne in die problematische Diskussion darüber einzutauchen, wie stark der Einfluss der CO₂-Konzentration auf die Temperatur ist, nehmen wir den „schlimmsten Fall“ einer vollständigen Vorhersagbarkeit der Temperatur als Auswirkung der CO₂-Konzentration an.



Ohne Annahmen über die C->T-Kausalität zu machen, wird die geschätzte funktionale Abhängigkeit des Temperatur aus der Regression mit der CO₂-Konzentration C wie folgt ermittelt:

$$T_{\text{proxy}} = -16,0 + 2,77 \cdot \ln(C) = 2,77 \cdot \ln(C/(323\text{ppm}))$$

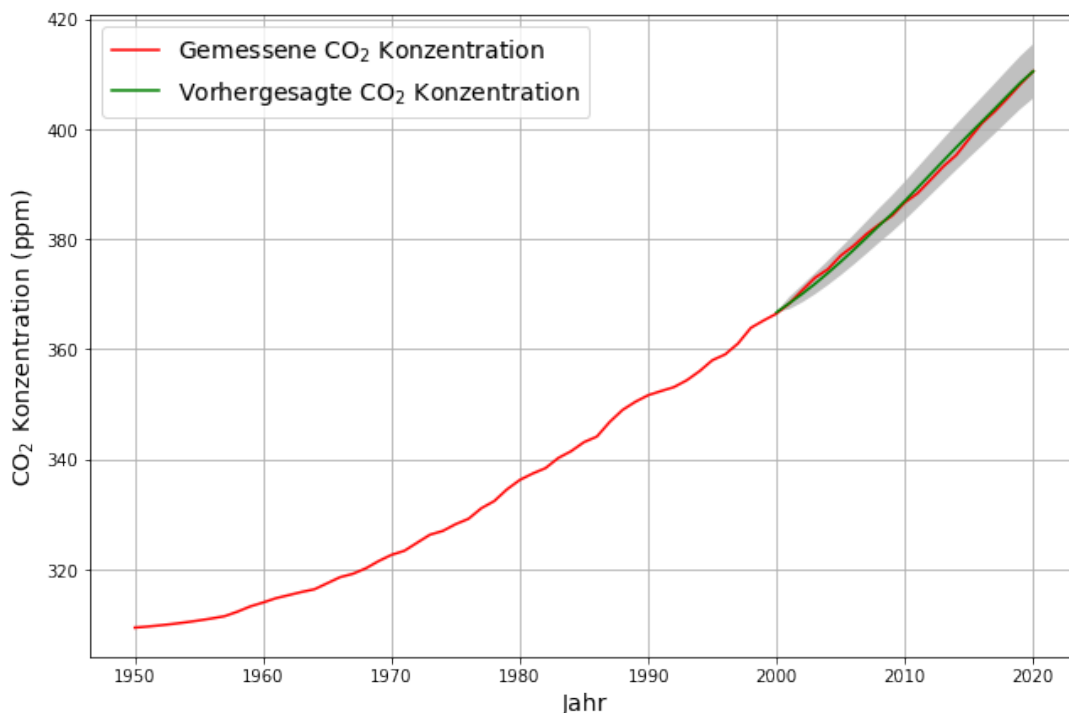
Dies entspricht einer Sensitivität von $2,77 \cdot \ln(2) \text{ °C} = 1,92^\circ \text{ C}$ bei Verdoppelung der CO₂-Konzentration

Modell-Validierung

Das Modell mit konstantem Absorptionsparameter von knapp 2% und konstanten natürlichen Emissionen wird aufgrund statistischer Prüfung als das zuverlässigste ausgewählt auf der Grundlage von Emissionsdaten und Konzentrationsdaten von

1950 bis 2000.

Die CO₂ Konzentrationen zwischen 2000 und 2020 werden vom Modell und den Emissionsdaten 2000-2020 vorhergesagt.

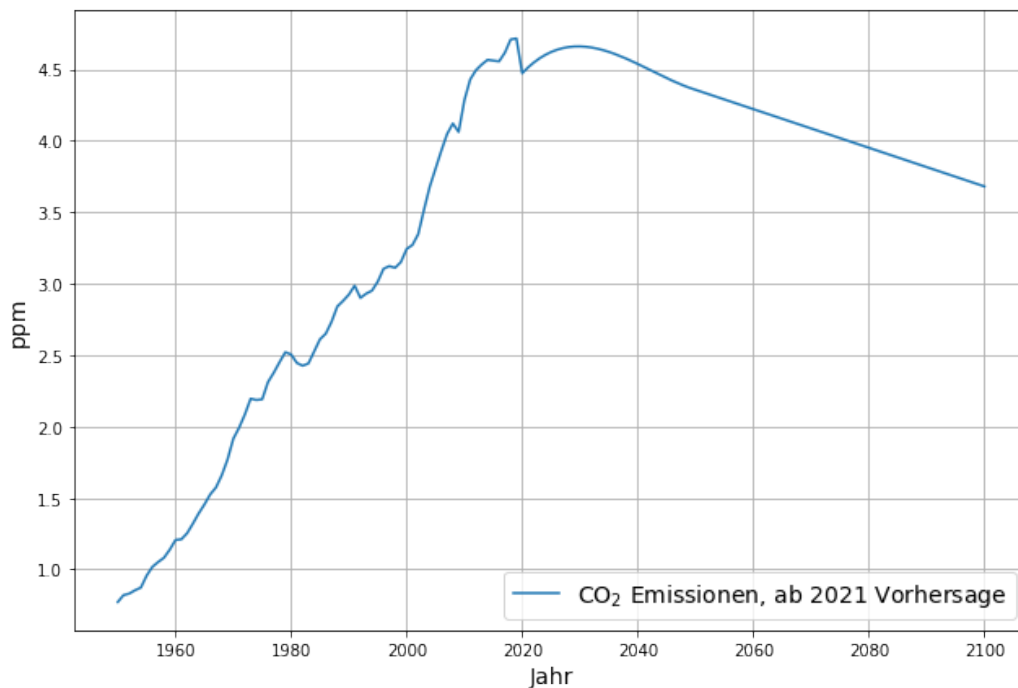


Dies ist eine hervorragende Vorhersage der Konzentrationen auf der Grundlage der Emissionen und der oben genannten Modellannahmen. Es gibt nur geringe Abweichungen zwischen den Vorhersagen und den tatsächlichen Daten. Obwohl das Modell unterschiedliche Absorptionen im Laufe der Zeit zulässt, führen die Daten der letzten 70 Jahre, d.h. des Zeitraums, in dem die meisten anthropogenen CO₂ -Emissionen stattfanden, zu der Schlussfolgerung, dass der CO₂ -Absorptionsparameter keine signifikante temperatur- oder sonstige zeitabhängige Komponente aufweist und ein aktueller CO₂ -Emissionsimpuls mit einer Halbwertszeit von 37 Jahren absorbiert wird.

Zukünftiges Emissionsszenario

Das wahrscheinlichste zukünftige Emissionsszenario ist das Emissionsszenario der internationalen Energieagentur (IEA) mit annähernd konstanten, leicht sinkenden globalen Emissionen. Der tatsächlich verwendete Datensatz für eine realistische Zukunftsprojektion („stated policies“) wird durch eine

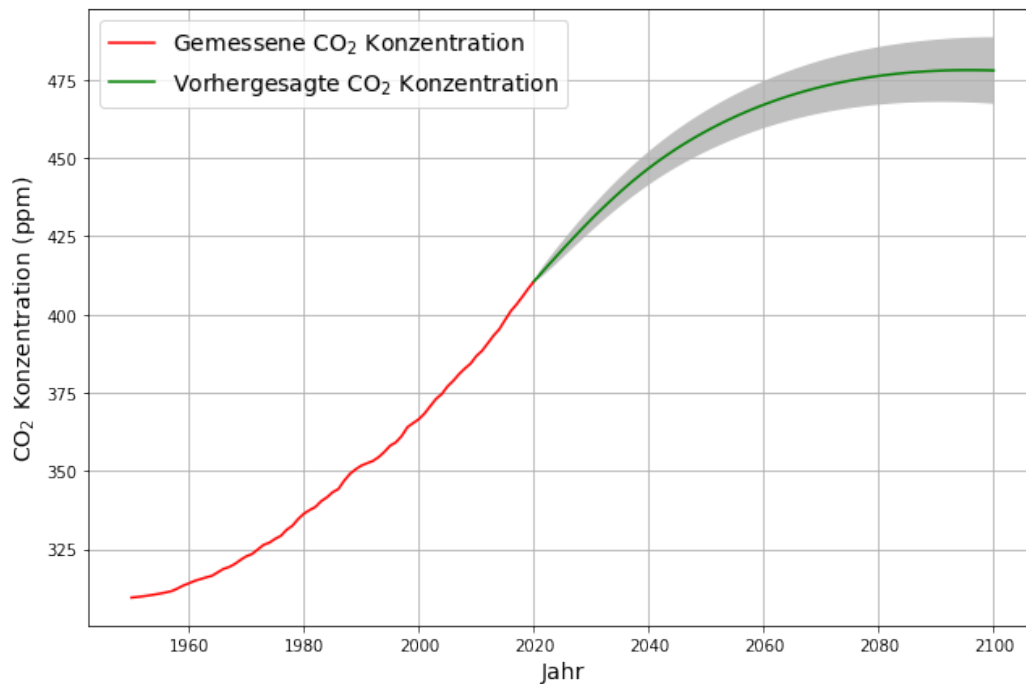
Trendextrapolation über das Jahr 2050 hinaus erweitert. Die Emissionen werden im Jahr 2100 nicht auf Null reduziert werden, sondern ähnlich dem Wert von 2005 sein.



Vorhersage der künftigen CO₂ Konzentration

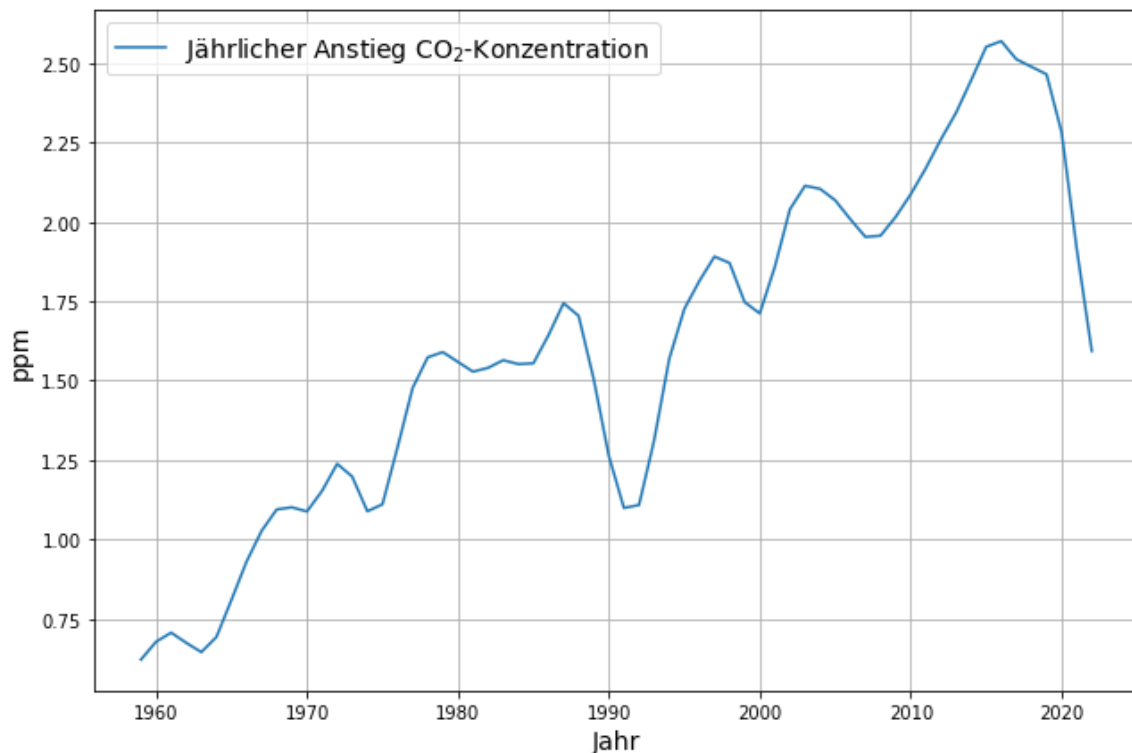
Aus diesem realistischen Emissionsszenario wird die zukünftige CO₂-Konzentration mit unserem Modell rekursiv vorhergesagt.

Mit dem von der IEA angegebenen Szenario der „erklärten Maßnahmen“, d.h. Fortschreibung der heutigen Gesetzgebung, wird in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ein Gleichgewicht der CO₂-Konzentration von ca. 475 ppm erreicht werden. Auf der Grundlage der obigen empirischen CO₂-Temperaturproxy-Gleichung entspricht dieser Anstieg der CO₂-Konzentration von 410 ppm (im Jahr 2020) auf 475 ppm einem Temperaturanstieg von 0,4°C ab 2020 bzw. 1,4°C ab 1850.



Daraus folgt, dass wir in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts eine maximale CO₂-Konzentration von etwa 475 ppm erwarten können. Zu diesem Zeitpunkt werden die Emissionen durch die Absorption vollständig ausgeglichen sein, was per Definition die „Netto-Null-Situation“ darstellt.

Ganz offensichtlich besitzt diese Kurve einen Wendepunkt, also einen Punkt mit maximalem Konzentrationsanstieg. Mit bloßem Auge ist nicht erkennbar, ob der in der nahen Zukunft sein muss oder bereits in der Vergangenheit. Eine Analyse der Konzentrationsdaten bis Ende 2022 ergibt, dass das Maximum der Steigung und damit der Wendepunkt der Konzentration bereits im Jahre 2016 gewesen war, eine sehr schöne Bestätigung des vorgestellten Konzepts:



Geht man von dem unwahrscheinlichen pessimistischen Fall aus, dass die CO₂-Konzentration für alle globalen Temperaturveränderungen voll verantwortlich ist, so beträgt der maximale erwartete Anstieg der globalen Temperatur, der durch den erwarteten Anstieg der CO₂-Konzentration verursacht wird, 0,4° C ab jetzt oder 1,4°C ab Beginn der Industrialisierung.

Wenn wir also mit den derzeitigen CO₂ -Emissionen und einer Effizienzsteigerung von 3 % pro Jahrzehnt weiterleben, ist das optimistische Pariser Klimaziel von 1,5° bei Netto Null erfüllt.

Wieviel Erde braucht der

Mensch?

[latexpage]

Energiewende für einen 4-Personen Haushalt

Die Energiewende geht von der Zielvorstellung aus, dass der komplette Energiebedarf durch Wind- und Sonnenenergie gedeckt werden soll. Beide Energiearten zeichnen sich dadurch aus, dass sie

1. volatil sind, d.h. nicht die ganze Zeit verfügbar sind,
2. dass sie keine hohe Energiedichte haben, d.h. viel (Boden-)Fläche beanspruchen

Ziel dieser Untersuchung ist, an dem eingeschränkten konkreten Beispiel der Basisenergieversorgung eines beispielhaften 4-Personen Haushalt in Form von

- Elektrizität
- Warmwasser
- Heizung

zu ermitteln, wie groß der Flächenbedarf für eine Vollversorgung mittels Photovoltaik ist, ohne Energiesubventionierung durch Backup von Kohle-, Gas- oder Kernkraftwerken.

Annahmen zum Verbrauch und Energiespeicherung

Beim Verbrauch wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Der direkte Stromverbrauch beträgt im Jahr 4000 kWh.
- Der Aufwand zum Aufheizen des Warmwassers beträgt effektiv 3000 kWh, durch die Verwendung einer Wärmepumpe wird ein reduzierter Verbrauch von 1000 kWh erwartet. Der Verbrauch wird zu allen Jahreszeiten als gleich angenommen.

- Bei der Heizung wird es komplizierter, weil diese stark von der Bauweise des Hauses abhängt. Stand heute dürfte [die sinnvollste Annahme die eines durchschnittlich alten Hauses \(Baujahr 2002\) mit 140 \$\text{m}^2\$ Wohnfläche sein](#), mit einem Wärmeenergiebedarf von $100 \text{ kWh/m}^2 = 14.000 \text{ kWh}$. Davon können 3000 kWh für Warmwasser abgezogen werden.

Energieerzeugung, Speicherung mit Batterien und Wasserstoff

Batteriespeicher für Tag/Nacht-Ausgleich

Für die kurzfristige Speicherung photovoltaischen Stroms, d.h. zur Überbrückung der Tag-/Nachtvolatilität werden Batteriespeicher angenommen, was zu einer 75% Strom-Autarkie im Jahresdurchschnitt führt. Von diesen 75% stammt die Hälfte direkt und damit verlustlos von der Photovoltaik, die andere Hälfte, also 37,5% kommen vom Batteriespeicher unter der optimistischen Annahme von 10% Verlust. Die restlichen 25% müssen aus gespeichertem Wasserstoff generiert werden. Der Batteriespeicher ist so bemessen, dass er etwa die Kapazität des halben durchschnittlichen Tagesbedarfs hat, im Beispiel also 6 kWh.

Brennstoffzelle und Wärmepumpe für die Heizung

Da die Heizung im überwiegend sonnenarmen Winter erfolgt, kann allenfalls 1/3, also etwa 3500 kWh durch die direkte Umwandlung von PV-Strom mit einer Wärmepumpe gewonnen werden. Der Rest von 7500 kWh erfolgt durch Speicherung von Wasserstoff und Rückumwandlung in Elektrizität und Wärme. Die Kennzahlen dazu sind exemplarisch der [Spezifikation der Panasonic Brennstoffzelle](#) entnommen. Diese 5 kW Brennstoffzelle hat einen elektrischen Wirkungsgrad von 56% und einen thermischen Wirkungsgrad von 39%, also fallen pro kWh Wasserstoff 0,56 kWh Strom und 0,39 kWh verwertbare Wärme an. Erfolgt die Heizung mit einer Wärmepumpe, dann wird der Stromanteil um den [COP-Faktor](#) „aufgewertet“. Um eine realistische Bewertung abzugeben, verwende ich einen konservativen COP-Faktor von 3. Je nach individuellen

Gegebenheiten kann dieser bis maximal 5 sein. Der effektive Heizwert des Wasserstoffs ist dann pro erzeugte kWh $0,56 \text{ kWh} \cdot 3 + 0,39 \text{ kWh} = 2,07 \text{ kWh}$, also etwas mehr als das doppelte des theoretischen Brennwertes, maximal bei einem COP-Faktor von 5 sind es 3,19 kWh.

Elektrolyse für die Wasserstoff-Erzeugung

Bei der Elektrolyse wird einen Wirkungsgrad von 62,5% angenommen, gemäß des [Datenblatts des Enapter Elektrolyseurs](#), der z.B. in der [Komplettlösung PICEA](#) Anwendung findet. Die Wärme des Elektrolyseurs kann ggf. zur Warmwasserbereitung mitverwendet werden, da sie aber überwiegend in der warmen Jahreszeit anfällt, wird sie hier nicht berücksichtigt. **1 kWh primäre PV Energie erzeugt demnach 0,625 kWh Wasserstoff (und etwa 0,33 kWh nicht speicherbare Wärme), bei Nutzung einer Brennstoffzelle und Wärmepumpe also 1,29 (maximal 2) kWh Heizwärme und 0,35 kWh nutzbare elektrische Energie.**

Flächenbedarf

Zur Berechnung der notwendigen Kollektorfläche wird der Gesamtverbrauch aufgeteilt:

1. Stromnutzung direkt vom Modul oder dem Batteriespeicher mit einem mittleren Wirkungsgrad von 95%, für elektrische Verbraucher, Warmwasser und Heizung in der Übergangszeit:

$$5000 \cdot 0,75 + \frac{3500}{3} \cdot \frac{100}{95} \text{ kWh} = 5175 \text{ kWh}$$
2. Stromerzeugung aus gespeichertem Wasserstoff bei einem Gesamtwirkungsgrad von 35%, für elektrische Verbraucher und Warmwasser (die Abwärme der Brennstoffzelle wird als Wärmequelle für die Wärmepumpe im Winter verwendet):

$$(5000 \cdot 0,25) \cdot \frac{100}{35} \text{ kWh} = 3571 \text{ kWh}$$
3. Heizwärme aus gespeichertem Wasserstoff bei einem Gesamtwirkungsgrad von 129%:

$$7500 \cdot \frac{100}{129} \text{ kWh} = 5814 \text{ kWh}$$

Daraus ergibt sich ein Gesamtbedarf von primärer PV-Energie von 14.560 kWh im Jahr, also eine Durchschnittsleistung von 1661 Watt. Das entspricht bei dem in Deutschland mittleren Ertrag von 10,6% der installierten Maximalleistung einer installierten Leistung von 15,7 kW_p, also 39 Module zu je 400 W_p mit einer Gesamtmodulfläche von 67 qm. Bei Abweichungen von der optimalen Südausrichtung steigt die Anzahl der notwendigen Module.

Unter der Voraussetzung der Nutzung einer Wärmepumpe wird zusätzlich noch Gartenfläche für den sog. Wärmekollektor benötigt, ungefähr 40qm pro KW Heizleistung. Bei 11 KW Heizleistung müssen also 440 qm Garten aufgegraben und mit einem Wärmekollektor bestückt werden. Die Bepflanzung auf dieser Fläche ist stark eingeschränkt.

Die von der Photovoltaik beanspruchte effektive Bodenfläche ergibt sich unter der Annahme von durchschnittlich etwa 10,5 W/qm Bodenfläche. Dieser Wert ist deswegen deutlich niedriger als die Leistung pro Modulfläche, weil die Module in der Regel schräg gestellt sind, und somit etwa die doppelte Modulfläche verschatten. PV-Module, die in die gleiche Richtung ausgerichtet sind, können im Mittel nicht dichter aufgestellt werden. Diese Bodenfläche wird implizit auch bei Dachmontage beansprucht, sie überlappt sich dann aber mit der Grundfläche des Gebäudes. **Bei der Modellrechnung ergibt sich also eine Mindestbedarf von 158 qm Bodenfläche, um den Energiebedarf für Strom, Warmwasser und Heizung eines durchschnittlichen 4 Personen-Einfamilienhauses zu decken.** Diese Fläche ist für jeden Haushalt notwendig, daher ist die reine PV-basierte Lösung für Mehrfamilienhäuser, wo der einzelnen Familie weniger nutzbare Fläche zur Verfügung steht, unrealistisch. Von Stadthäusern und gemieteten Wohnungen ganz zu schweigen. Eine dort auf dem Dach installierte Anlage kann allenfalls einen Teil des Bedarfs abdecken. Die besten Voraussetzungen hat ein Einfamilienhaus mit großem Grundstück, dessen Qualität durch die installierte Wärmepumpe deutlich eingeschränkt wird.

Potential von Brennholz

Bestandserhaltend geerntetes Brennholz ist eine nachhaltige Energiequelle, kann also ebenfalls als künftiger Energieträger berücksichtigt werden. Eine Überschlagsrechnung zeigt das Potential von Brennholz als Beitrag zum Heizen von Wohngebäuden:

Deutschland hat eine [Waldfläche von 11,7 Millionen ha](#) und [\(Stand 31.12.2021\) eine Einwohnerzahl von 82,3 Millionen](#). Das ist ein rechnerischer Anteil von 0,137 ha Waldfläche pro Einwohner.

[Der bestandserhaltende Holzertrag ist etwa 12 Festmeter bzw. 22 Raummeter pro ha und Jahr](#). Die tatsächliche [durchschnittliche Holzverwendung für Brennholz in privaten Haushalten war im Schnitt der letzten 15 Jahre etwa 30 Millionen Festmeter pro Jahr](#). Das entspricht einer Nutzung von 10 Raummeter pro ha im Jahr auf der Hälfte der verfügbaren Waldfläche. Soviel (d.h. 7-10 Raummeter) kann man bei naturverträglicher Brennholz-Nutzung erwarten. Da aber außer der privaten Nutzung nochmal etwa genauso viel in [Kleinf Feuerungsanlagen](#) und [Großfeuerungsanlagen](#) verbrannt wird, muss davon ausgegangen werden, dass ein großer Teil unseres Brennholzes importiert und daher nicht nachhaltig verwendet wird, [z.B. aus Rumänien stammt](#).

[Der durchschnittliche Heizwert von Brennholz wird mit 1600 kWh/Raummeter geschätzt](#), was etwa 2900 kWh/Festmeter entspricht.

Würde die ganze Waldfläche systematisch nachhaltig bewirtschaftet und wird knapp die Hälfte als Brennholz verwendet, steht rechnerisch für jeden Einwohner pro Jahr die Heizenergie von

$$0,137 \cdot 10 \cdot 1600 \text{ kWh} = 2192 \text{ kWh}$$

zur Verfügung. Für einen 4-Personen-Haushalt also 8768 kWh. Das entspricht ungefähr der o.g. Heizenergie aus gespeichertem Wasserstoff (7500 kWh). Optimistisch gesehen, kann also langfristig für den größten Teil der Bevölkerung statt

Wasserstoff auch Holz zum nachhaltigen Heizen im Winter verwendet werden. Eine Verwendung in Kraftwerken wäre dann aber ausgeschlossen.

Die aktuelle für Privathaushalte verwendete Energiemenge aus Brennholz ist aber im Schnitt pro Person und Jahr nur $\$ \frac{30 \cdot 2900}{82.3} \text{ kWh} = 1057 \text{ kWh} \$$, was bei einem 4-Personen Haushalt 4288 kWh entspricht. [Grenzen der weiteren Nutzung werden insbesondere auch durch den Naturschutz gesetzt](#). Weiterhin ist zu prüfen, ob dieses Brennholz tatsächlich aus nachhaltiger Nutzung der heimischen Wälder stammt oder ob es importiert ist.

Fazit

Als Fazit ist festzuhalten, dass **das Ideal der Energiewende nur von einem Teil der Bevölkerung im eigenen Wohnbereich umgesetzt werden kann**, den wohlhabenden Eigentümern eines Einfamilienhauses. Zu dem Aufwand an Dach- und Bodenfläche kommt noch der finanzielle Aufwand für die beschriebenen Geräte. **Stand heute sind die Investitionskosten für ein solches autarkes System noch so teuer, dass in realistischen Amortisationszeiten von 10-20 Jahren allenfalls eine 75% Autarkie für die Stromgewinnung mit PV-Modulen und Batteriespeicher, und ggf. einer kleinen Wärmepumpe für die Warmwasserbereitung von März-Oktober mit Überschuss-PV-Strom sinnvoll ist.**

Dabei entfallen die horrenden Kosten für die Wasserstoff-Elektrolyse und Lagerung, sowie die teure und große Gartenflächen erfordernde Installation einer Heizungs-Wärmepumpe, dem nach aktueller Gesetzgebung künftig verpflichtenden Standard für neu installierte Heizsysteme.

Die Abschätzung über die Verwendung von Holz als – bereits üblichem – Energieträger zum Heizen weist einen Weg, die unbezahlbar teuren Investitionen in Wasserstoff als Energieträger für Privathaushalte zu umgehen. Allerdings sind die Begrenzungen zu berücksichtigen, die durch die nachhaltige Nutzung der Wälder gesetzt sind.

In diesen Betrachtungen wurde weder der Energieaufwand für den Mobilität noch der für die industrielle Herstellung aller Gebrauchsgüter berücksichtigt. [Eine neuere Studie](#) hat verschiedene Szenarien der Energieversorgung der Schweiz mit erneuerbaren Energien durchgerechnet, wo der Verkehr mitberücksichtigt wird.

Auch eine Kostenanalyse steht noch aus, da von einigen Produkten die Endkundenpreise (noch) nicht bekannt sind und zu erwarten ist, dass die – aktuell prohibitiven – Preise für Elektrolyseure und Brennstoffzellen deutlich fallen werden.

Flächenverbrauch der Photovoltaik

[latexpage]

Um den Flächenverbrauch für photovoltaische Energiegewinnung realistisch abzuschätzen, gehen wir von den existierenden PV-Anlagen in Deutschland aus. Nach den [Informationen des Fraunhofer Instituts](#) wurden 2020 in Deutschland durchschnittlich **926 kWh pro installiertem kWp** erzielt (50 TWh bei 54 GWp installierter Leistung), das sind durchschnittlich 10,5% der installierten PV-Leistung. Ein gängiges Modul mit 1,7 m² Fläche hat aktuell die Leistung 345-400 Wp. Pro m² Kollektorfläche ergibt sich demnach eine erwarteter Jahresertrag von 188-218 kWh. Verteilt auf die 8766 Stunden des Jahres ergibt sich also **ein theoretischer Durchschnittsertrag von 21,4-24,9 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$** .

Diese Überlegungen beziehen sich auf die aktive Kollektorfläche. Die Landnutzungsfläche ist um mindestens

einen Faktor 2 größer, weil die Kollektoren zur besseren Ausbeute schräg gestellt werden und demzufolge zur Vermeidung von Abschattung entsprechende Abstände bleiben müssen. Solange die Solarkollektoren auf Dächern montiert sind, spielen diese Überlegungen eine untergeordnete Rolle, aber bei Freilandanlagen entsteht auch bei Solaranlagen das Problem des Flächenverbrauchs. Demzufolge kann bei einer großflächigen Anlage in unseren Breitengraden höchstens von einem Durchschnittsertrag von $10,7-12,5 \frac{W}{m^2}$ Bodenfläche ausgegangen werden.

An [dem konkreten realen Solarparkprojekt](#) in Werneuchen, Brandenburg, lassen sich diese Werte überprüfen:

Nach Herstellerangaben werden auf 164 ha 465 000 Module mit einer gesamten installierten Leistung von 187 MW gebaut (pro Modul 402 W installierte Leistung, also modernste Hochleistungsmodule). Ein Modul mit $1.7 m^2$ Fläche beansprucht demnach etwa $3.5 m^2$ Bodenfläche, etwas mehr als die doppelte Modulfläche. **Der Boden-Flächenbedarf für 1kW installierte Leistung ist also $8.8 m^2$.**

Nach der oben beschriebenen offiziellen Statistik des Fraunhofer Instituts über die gesamte solare Stromproduktion in Deutschland ergibt sich **ein erwarteter Ertrag von 926 kWh/Jahr für jedes installierte kW**, das ist ein durchschnittlicher Ertrag (der aber nicht gleichmäßig verteilt anfällt) von etwa 106 Watt für jedes installierte kW. **Um 1 kW mittlerer Dauerleistung zu erzeugen, müssen also 9.5 kW physisch installiert werden, mit einem Boden-Flächenbedarf von $83.6 m^2$.** Für das volatile Äquivalent eines nicht-volatilen, grundlastfähigen AKW mit 1.5 GW Leistung werden demnach $125 km^2$ Bodenfläche benötigt.

Lösung der Volatilität durch Speicherung

Die durchaus signifikanten Verluste der kurzfristigen (Tag/Nacht) Speicherung mit Batterien (etwa 10% bei max. 1 Tag Speicherung) sollen in dieser groben Betrachtung vernachlässigt

werden. Realistisch können bei mehrtägiger Speicherung aufgrund der Leckströme nur 60-75% der eingesetzten Energie wieder gewonnen werden. Für eine langfristige Energiespeicherung kommen Batterien aus Material- und Kostengründen ohnehin nicht in Frage.

Wenn ein Anteil der solar erzeugten Energie über einen längeren Zeitraum, also chemisch gespeichert werden muß, ist aufgrund der Wandlungsverluste nach Wasserstoff und ggf. Methan mit einem deutlich höheren „Primärverbrauch“ an Energie zu rechnen.

Vereinfachend gehe ich von der Annahme eines – für die Herstellung und Wieder-Verstromung von Methan realistischen – Wirkungsgrades von 25% aus, mit dem 1/4 der zu erzeugenden Energie über einen längeren Zeitraum gespeichert werden muß, während 3/4 der Jahresenergie direkt oder mit kurzfristiger Batteriespeicherung verbraucht wird. Dies führt in der Summe zum 1.75-fachen Primärverbrauch. Die zusätzlichen 75% sind der Preis für die „Grundlastfähigkeit“.

Demzufolge hat jedes kW an saisonbereinigter, grundlastfähiger Dauerleistung einen Boden-Flächenbedarf von 146 m^2 .

Das Äquivalent von einem grundlastfähigen AKW der Leistung 1.5 GW beansprucht demnach eine Landfläche von etwa 220 km^2 , oder 147 km^2 Landverbrauch für jedes GW grundlastfähiger PV-Energie.

Die aktuelle Planung der Energiewende sieht einen Ausbau der Solarenergiegewinnung mit einer gesamten installierten Leistung von 200 GW vor. Das bedeutet einen **Gesamtflächenbedarf von 1760 km^2** , etwa 0,5% der Gesamtfläche Deutschlands bzw. knapp 1% der landwirtschaftlichen Nutzfläche. **Der durchschnittliche volatile Ertrag davon sind etwa 21 GW, bei Berücksichtigung von kurz- und langfristiger Speicherung zum Ausgleich der Volatilität verbleiben noch 12 GW grundlastfähige Leistung, gerade mal 20% der [aktuell benötigten elektrischen Energie von durchschnittlich 57 GW](#).**

Energiewende-Fakten

[latexpage]

Solarenergie ist im Winter unbrauchbar

Es gibt – teilweise prominente – Stimmen, im Winter mit photovoltaisch betriebenen Wärmepumpen zu heizen. Das ist eine völlig realitätsferne Illusion. Fakt ist, dass PV-Anlagen in unseren Breitengraden in den 4 Wintermonaten November-Februar so gut wie keine Leistung erbringen. Eine Anlage mit 6 KW installierter Leistung erbringt Ende Oktober kaum mehr als 3kWh am Tag, das entspricht dem Heizwert eines Braunkohlenbriketts.

Der Umstand, dass im Winter so wenig Sonnenenergie vorhanden ist, ist ja grade der Grund, dass es einen Winter gibt.

Eine Langzeitspeicherung mit Batterien ist unmöglich

Um den Strombedarf eines einzigen Haushaltes bei einem Tagesbedarf von 10 kWh während der Wintermonate zu decken, müßte der Bedarf von mindestens 4 Monaten über etwa 1/2 Jahr gespeichert werden, zusätzlich zum Tagesspeicher, der die Tag/Nacht-Volatilität ausgleicht. Das sind 120 Tage und demnach eine mindestens notwendige Gesamtspeicherkapazität von 1,2 MWh. Bei einem – sehr günstig angenommenen – Batteriepreis von 500 €/kWh sind das 600 000 € für den Batteriespeicher, bei einer Lebensdauer von 10 Jahren, von der Umweltbelastung und dem Platzbedarf für diese riesige Speichermenge ganz abgesehen. Das wären reine Batteriekosten von 60 000 € pro Winter – ausschließlich für den Strombedarf, ohne Heizung oder Mobilität.

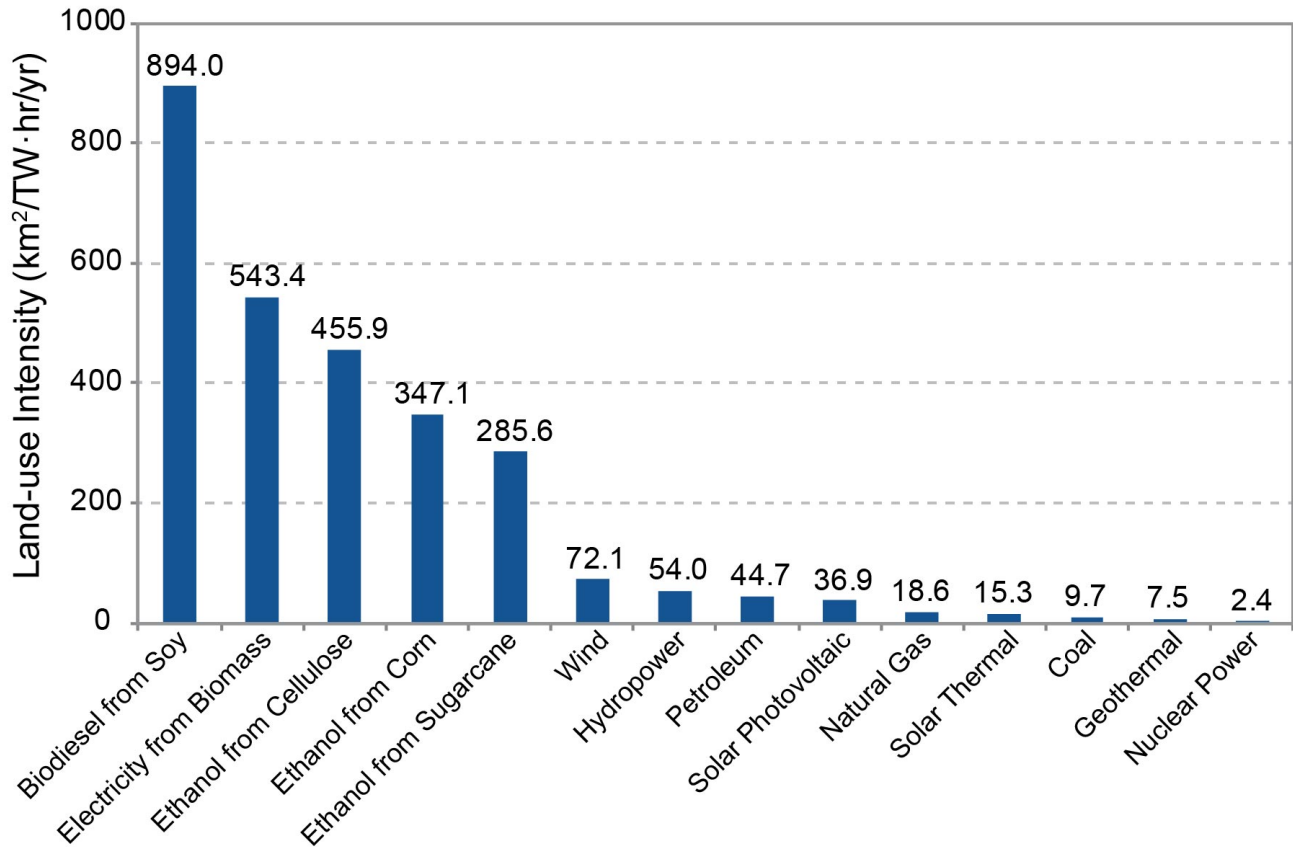
Eine Studie zeigt [am Beispiel der Versorgung eines Rechenzentrums](#), dass **eine Langzeitspeicherung nur in chemischer Form, also z.B. Wasserstoff oder Methangas (Power-to-gas) erfolgen kann**, bei der Energiespeicherung mit flüssigem Wasserstoff wäre der durchschnittliche Strompreis etwa 120 $\$/MWh$, bei einer hypothetischen Speicherung mit Li-Ionen Batterien wäre er über 4000 $\$/MWh$.

Das Power-to-Gas Verfahren hat mit PV-Strom den gleichen CO₂ Fußabdruck wie fossiles Erdgas

Die Herstellung von Solar-Paneelen ist sehr energie-intensiv. Deren Herstellung erfolgt überwiegend mit fossilen Energiequellen. [Ohne Berücksichtigung der Entsorgung der Solar-Paneele ist der CO₂-Fußabdruck bei der Photovoltaik-Energiegewinnung etwa 132 \$\frac{g}{kWh}\$](#) . Die Stromspeicherung mit dem Power-to-gas Verfahrens hat bekanntermaßen einen Wirkungsgrad von nur 25%. Das bedeutet, dass für die gespeicherte Energie die 4-fache Menge an elektrischer Energie erzeugt werden muß. **Daher hat der über das power-to-gas Verfahren erzeugte Strom einen CO₂ Fußabdruck von 528 $\frac{g}{kWh}$** . [Das ist etwa der gleiche Betrag an CO₂, der beim Betrieb eines mit Erdgas betriebenen Kraftwerks](#). Demzufolge ist mit heutigen Solarzellen im Vergleich zu einem modernen Gaskraftwerk hinsichtlich von CO₂ Emissionen nichts gewonnen.

Energiepflanzen und Biogas sind keine skalierbare Lösung

Projected Land-use Intensity in 2030



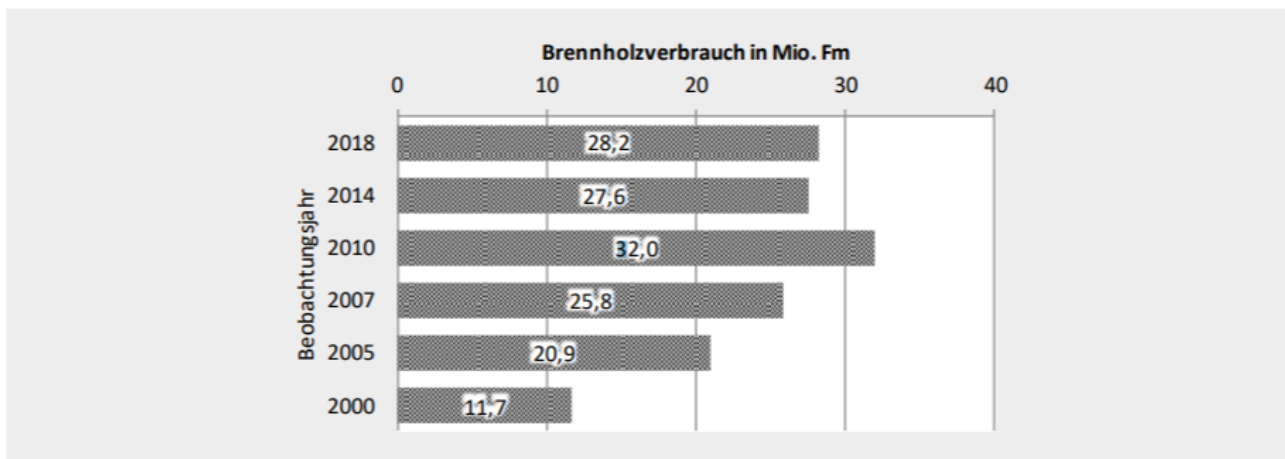
Betrachtet man den reinen Energieertrag pro Flächeneinheit bei dem über viele Jahrhunderte verwendeten wichtigsten nachhaltigen Brennstoff, dem Brennholz, so kommt man mit einer einfachen Rechnung zu dem Schluß, dass bei nachhaltiger Bewirtschaftung, also bei der maximal möglichen Entnahme von $10 \frac{\text{Fm}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$ von den nachwachsenden $11,2 \frac{\text{Fm}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$ und einem angenommenen durchschnittlichen Heizwert von $1800 \frac{\text{kWh}}{\text{Rm}}$ ($1 \text{ Fm} = 1,4 \text{ Rm}$) der Flächen-Energieertrag gerade mal $\frac{10 \cdot 1,4 \cdot 1800}{8766} = 2,9 \frac{\text{kW}}{\text{ha}} = 0,29 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ beträgt.

Auch wenn man bei nachhaltiger Forstwirtschaft nicht wirklich von Landschaftsverbrauch sprechen kann, wollen wir diese Kenngröße ($\frac{\text{km}^2}{\text{TWh/Jahr}}$) im Sinne von benötigter Fläche zum Erzeugen einer bestimmten Energiemenge berechnen, um einen Bezug zu anderen Energiepflanzen herstellen zu können. $\frac{1}{10 \cdot 1,4 \cdot 1800} \frac{\text{ha}}{\text{kWh/Jahr}} = \frac{10^7}{25200} \frac{\text{km}^2}{\text{TWh} \cdot \text{Jahr}} \approx$

$400 \frac{\text{km}^2}{\text{TWh/Jahr}}$ \$\$

Der reale durchschnittliche Holzeinschlag in Deutschland ist de facto nur die Hälfte der obigen Annahme, nämlich etwa 55 Mio Fm bei einer gesamten Waldfläche von 11 Mio ha (es gibt widersprüchliche Angaben, demnach wurden in den Jahren 2000-2012 durchschnittlich 76 Mio Fm/Jahr geerntet). Davon werden etwa 28 Mio Fm, also ungefähr die Hälfte als Brennholz verwendet (das Bundesministerium für Landwirtschaft verbreitet die wahrscheinlich falsche Information, es wären 68 Mio Fm). Das bedeutet, dass aktuell etwa $28 \cdot 10^6 \text{ Fm} \cdot 1.4 \frac{\text{Rm}}{\text{Fm}} \cdot 1800 \frac{\text{kWh}}{\text{Rm} \cdot \text{Jahr}} \approx 70 \frac{\text{TWh}}{\text{Jahr}} = 254 \frac{\text{PJ}}{\text{Jahr}}$ an Energie aus landeseigenem Holz gewonnen werden. Aus dem Umstand, dass für den Endenergieverbrauch an Holz (für 2018) aber 743 PJ angegeben werden (für den Primärenergieverbrauch noch mehr), muß ich annehmen, dass wir das Doppelte unserer eigenen Brennholzproduktion aus dem Ausland importieren.

Abb. 2: Entwicklung des Brennholzverbrauchs zwischen 1994 und 2018



Quellen: Nach Mantau 2004; nach Mantau und Sörgel 2006; nach Hick und Mantau 2008; nach Mantau 2012; nach Döring et al. 2016.

Selbst bei einer Steigerung der nachhaltigen energetischen Nutzung auf 2/3 der Waldfläche ist damit der in Deutschland maximal erreichbare Energieertrag (wegen der Nutzung weniger energiereichen Holzes wird der angenommene Heizwert auf $1500 \frac{\text{kWh}}{\text{Rm}}$ gesenkt) $11 \cdot 10^6 \text{ ha}$

$$\cdot \frac{2}{3} \cdot 10 \cdot \frac{F_m}{ha} \cdot 1.4 \frac{R_m}{F_m} \cdot 1500 \frac{kWh}{R_m} = 154 \text{ TWh/Jahr } \$\$$$