

Emissionen und CO₂-Konzentration – Ein evidenzbasierter Ansatz

[latexpage]

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

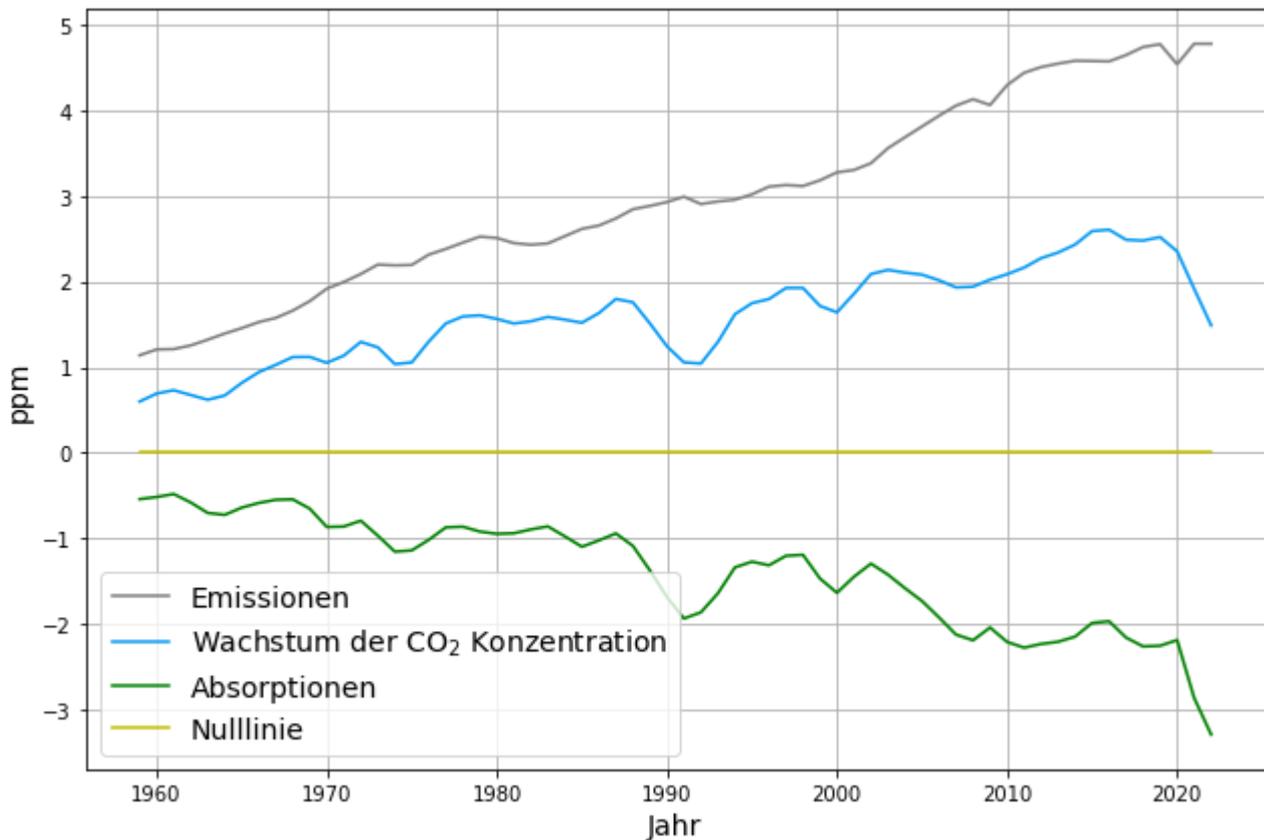
1. es legitim ist, die ohnehin mit großen Unsicherheiten behafteten Landnutzungsemissionen den unbekanntem natürlichen Emissionen zuzuschlagen
2. sich der statistische Fehler des Ergebnisses bei Weglassen der aufgrund der Unsicherheit ziemlich willkürlichen Landnutzungsänderung verringert, was zu höherer Prognosequalität führt.

Massenerhaltung von CO₂

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

Konzentrationswachstum = Emissionen – Absorptionen

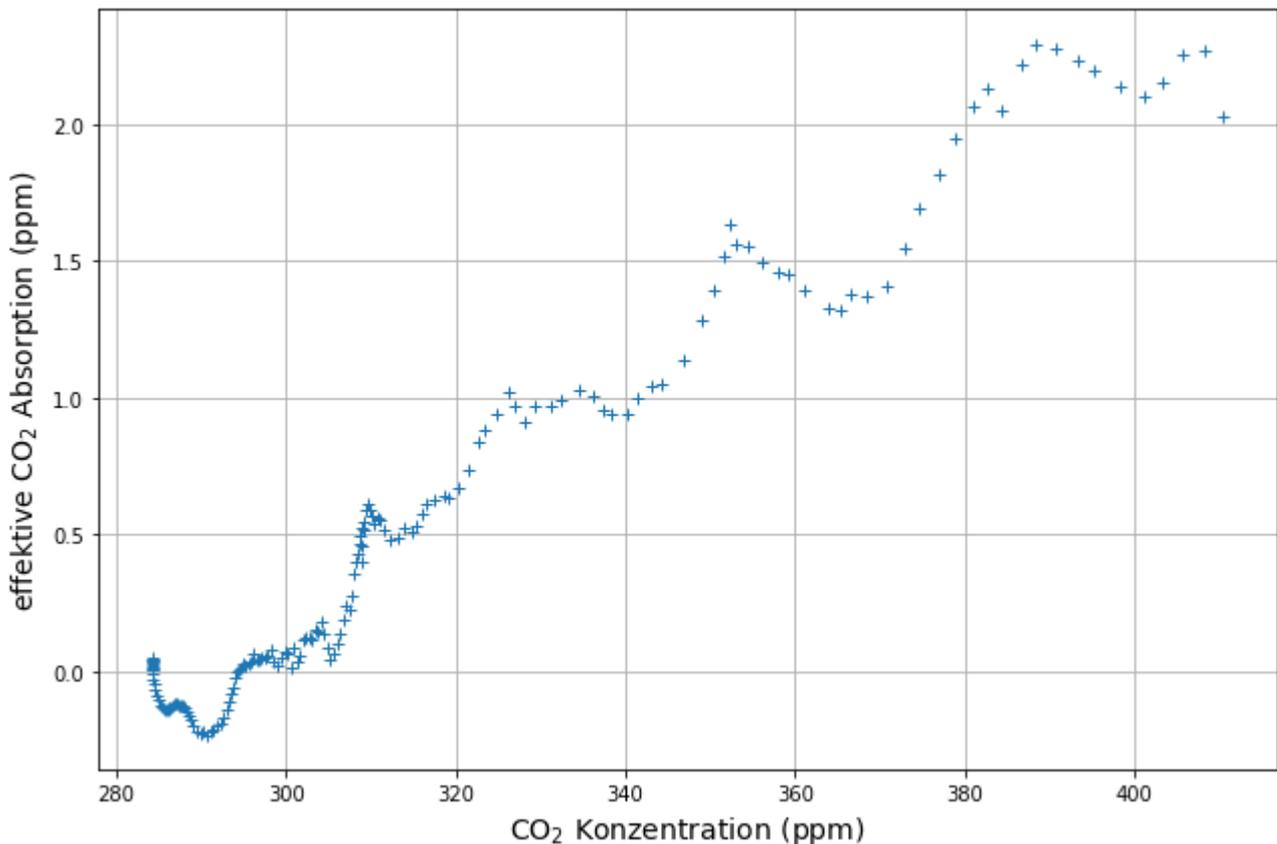
Damit diese Gleichung korrekt ist, müssen alle Größen in derselben Maßeinheit gemessen werden. Hier verwenden wir ppm („part per Million“, 1 ppm = 7,78 Gt CO₂). Der jährliche Anstieg im Jahre i der CO₂-Konzentration $C_{i} - C_{i-1}$ (blau) wächst im Schnitt langsamer die gesamten anthropogenen Emissionen E_i (grau), was bedeutet, dass die daraus berechnete Netto Absorption A_i (grün) mit der steigenden CO₂-Konzentration tendenziell zunimmt: $A_i = E_i - (C_{i} - C_{i-1})$ Für die bessere Erkennbarkeit werden die Absorptionen mit negativem Vorzeichen dargestellt:



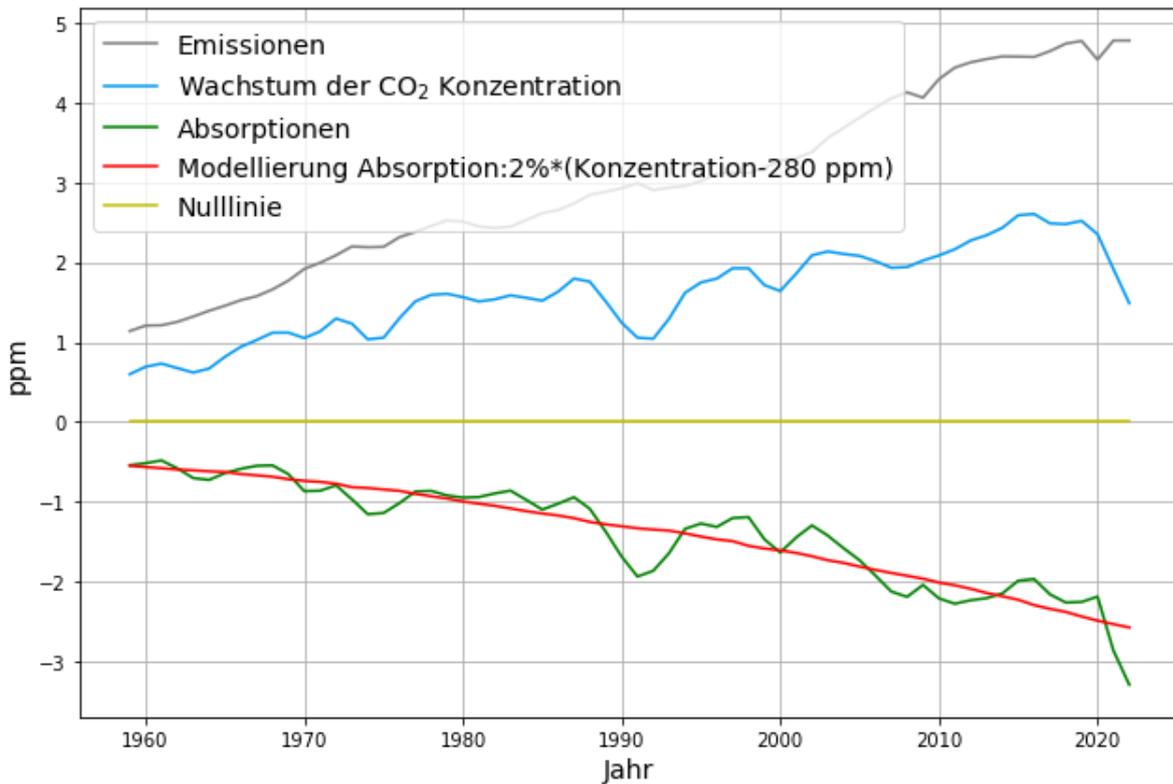
Wichtig ist hierbei zu bemerken, dass alle natürlichen Emissionen und Absorptionen, die innerhalb der Messintervalle (hier je 1 Jahr) geschehen und sich ausmitteln, „unsichtbar“ sind.

Die Annahme einer annähernden Linearität der relevanten Absorptionsprozesse

Dies wird durch ein Streudiagramm veranschaulicht, das die effektive CO₂-Absorption mit der CO₂-Konzentration in Beziehung setzt. Physikalischer Hintergrund dieser Darstellung ist, dass alle Diffusions- und Absorptionsprozesse mit der Konzentration linear skalieren, ebenso die Aufnahme von CO₂ bei der Photosynthese (C₄-Pflanzen haben ein Plateau mit geringem aber trotzdem linearen Anstieg im Konzentrationsbereich 280..600 ppm).

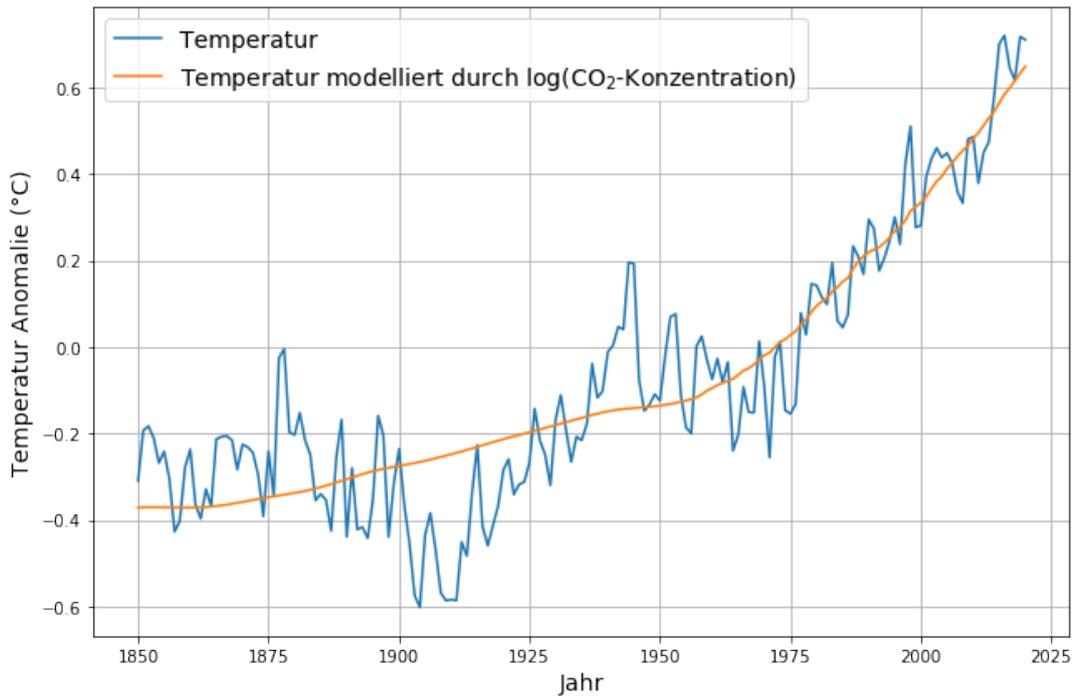


Es legt eine langfristige lineare Abhängigkeit der effektiven Absorption von der atmosphärischen CO₂-Konzentration mit erheblichen kurzfristigen Abweichungen (Vulkane, el Nino etc.) nahe, wobei die effektive Null-Absorptionslinie bei ca. 280 ppm geschnitten wird. Dies wird als die vorindustrielle CO₂-Gleichgewichtskonzentration C_0 angesehen, bei der die natürlichen jährlichen Emissionen durch die jährlichen Absorptionen ausgeglichen sind. Die durchschnittliche jährliche Absorption beträgt etwa 2 % der CO₂-Konzentration, die 280 ppm überschreitet. Das Modell der Absorption im Jahre i ist also $A_i = a \cdot (C_{i-1} - C_0)$ mit der Logik, dass die aktuellen Veränderungen sich aus dem Zustand des Vorjahres berechnen. Die Modellparameter werden aus den Messdaten mit dem Verfahren kleinster Quadrate bestimmt:



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 hypothetisch den Fall einer vollständigen Vorhersagbarkeit der Temperatur als Auswirkung der CO₂-Konzentration an. Dies ist kein „Glaubensbekenntnis“ in eine bestimmte Richtung, sondern eine pragmatische Arbeitshypothese, um nicht vom Kernthema durch eine an dieser Stelle unangebrachten Diskussion abzulenken.



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:

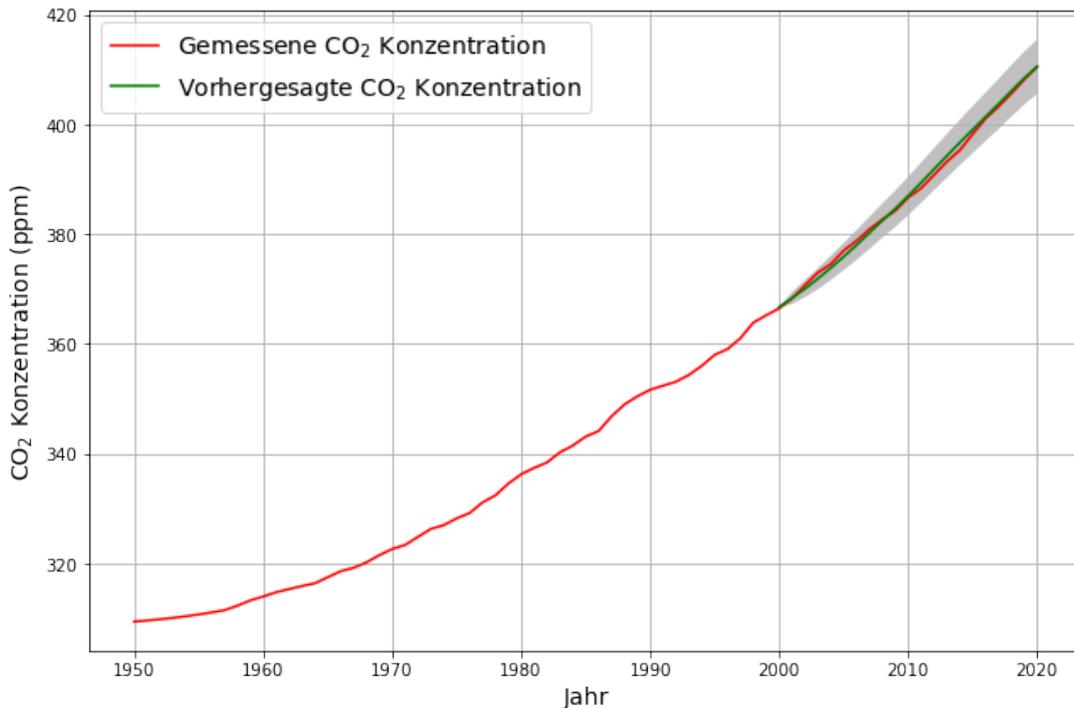
$$T_{\text{proxy}} = -16,0 + 2,77 \cdot \ln(C) = 2,77 \cdot \ln(C/(323\text{ppm}))$$

Dies entspricht einer Sensitivität von $2,77 \cdot \ln(2) \text{ °C} = 1,92 \text{ °C}$ 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.

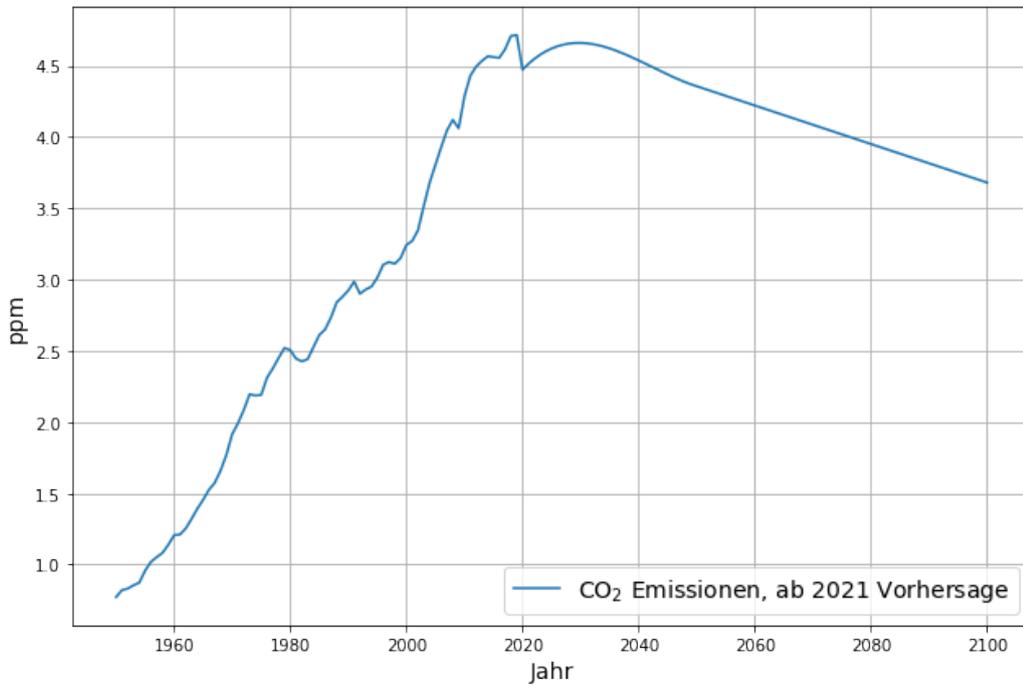
Die CO₂ Konzentrationen zwischen 2000 und 2020 werden vom Modell und den Emissionsdaten 2000-2020 vorhergesagt:



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 mit funktional unterschiedlichen [zeit- und temperaturabhängigen Absorptionverläufen geprüft wurde](#), 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 35-42 Jahren absorbiert wird.

Zukünftiges Emissionsszenario

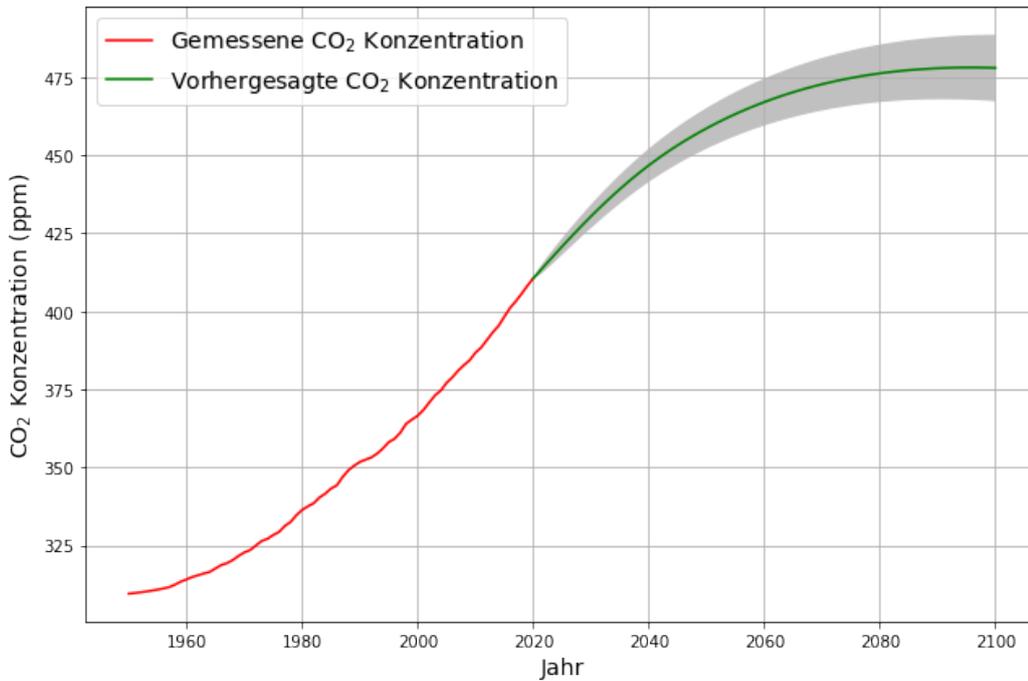
Das wahrscheinlichste zukünftige Emissionsszenario ist das Emissionsszenario der internationalen Energieagentur (IEA) mit annähernd konstanten, leicht sinkenden globalen Emissionen. Der tatsächlich verwendete Datensatz für eine realistische Zukunftsprojektion („stated policies“) wird durch eine Trendextrapolation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

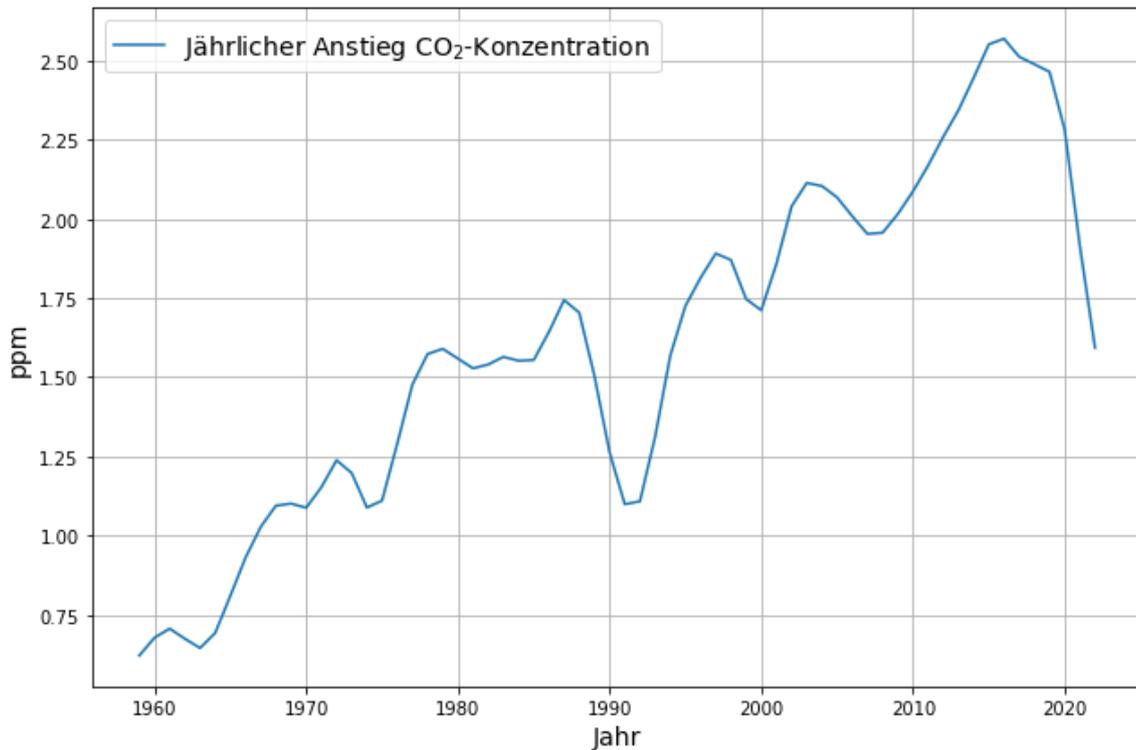
Aus diesem realistischen Emissionsszenario wird die zukünftige CO₂-Konzentration mit unserem Modell rekursiv vorhergesagt: $C_i = C_{i-1} + E_i - a \cdot (C_{i-1} - C_0)$

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 hypothetischen Fall aus, dass die CO₂-Konzentration für alle globalen Temperaturveränderungen verantwortlich ist, so beträgt der mittels obiger Proxy-Gleichung ermittelte 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.