Der CO2 Zyklus der Erde und seine Zukunft

geschrieben von Prof. Dr. Horst-joachim Lüdecke | 22. Januar 2017

Zusammenfassung

Das Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) stellt Messdaten des CO2 Zyklus zur Verfügung, die mit dem Jahre 1959 beginnen und eingeschränkt bis 1850 zurückreichen. Die geringen Mengen von anthropogenem CO2 um das Jahr 1750, welche durch erste Anfänge der Industrialisierung und stärkere Holzverbrennung erzeugt wurden, gelangten noch vollständig in die Atmosphäre. Die heute emittierten CO2 Mengen, die inzwischen den CO2 Gehalt der Luft um 100 ppm erhöht haben, gehen aber nur noch zur Hälfte in die Atmosphäre. Die andere Hälfte wird etwa zu gleichen Teilen vom Ozean und der Biosphäre aufgenommen. Diese Verschiebung wird bei starken anthropogenen CO2 Emissionen der weiteren Zukunft in einen Zustand übergehen, bei dem alles anthropogene CO2 nur noch vom Ozean aufgenommen wird und damit der CO2 Anstieg in der Atmosphäre zum Stillstand kommt.
Unser Modell gibt den globalen CO2 Zyklus in guter Übereinstimmung mit den CDIAC Messungen über mehr als 160 Jahre wieder. Es handelt sich um die CO2 Konzentration der Atmosphäre und die jährlichen CO2 Flüsse in die Atmosphäre, den Ozean und die Biosphäre. Gleiches leisten die bisher veröffentlichten Modelle trotz größerer Komplexität nicht. Unsere Modellvorhersage für die nächsten 100 Jahre lässt auf Grund dieser langfristigen Übereinstimmung mit den Messungen Verlässlichkeit auch für die Zukunft erwarten. Als wesentliches Ergebnis wird die ansteigende CO2 Konzentration in der Atmosphäre zum Stillstand kommen und unter keinen Umständen ca. 800 ppm übersteigen. Dies ergibt auch eine Grenze für einen durch CO2 bewirkten Anstieg der Erdtemperatur. Da in den Arbeiten der Literatur der letzten Jahre die Klimasensitivität (Anstieg der Temperatur bei Verdopplung der CO2 Konzentration) auf unter 1 °C beziffert wird (hier), kann die Erdtemperatur selbst bei beliebig großen anthropogenen CO2 Emissionen nur um weniger als 1 °C ansteigen. Eine gefährliche Erderwärmung durch CO2, wie beispielsweise vom „Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen“ (WBGU) aktuell behauptet, stellt sich hiermit erneut – wie in vielen schon existierenden Arbeiten – als falsche Hypothese heraus.

Der CO2 Zyklus und seine Messung

Seit 1850 liegen Schätzungen der anthropogenen CO2 Emissionen vor, die auf den weltweit verbrannten Mengen an Kohle und Holz beruhen. Ferner ist die CO2 Konzentration der Luft aus Eisbohrkernanalysen bekannt. Ab 1959, dem Beginn der berühmten CO2 Messkurve von C.D. Keeling auf dem Mauna Loa (Hawaii), wurden dann erhebliche Anstrengungen zur Vermessung

des globalen CO2 Zyklus unternommen. Zu den Messungen des CO2 in der Luft kamen Messungen des CO2 Austauschs zwischen Atmosphäre, Ozean und Biosphäre hinzu. Das Carbon Doixide Information Analysis Center (CDIAC) veröffentlicht diese Messungen seit vielen Jahren regelmäßig in Rahmen seines Carbon Budget Projekts [4] (die in eckigen Klammern angegebenen Zitate sind hier generell die Zitate der Originalarbeit), die hierzu gehörende jüngste Fachveröffentlichung von Le Quéré (hier). Gleichzeitig erfuhr auch die Modellierung des CO2 Zyklus einen Aufschwung. Erstaunlicherweise wurde aber in der Fachliteratur bis heute kein Versuch unternommen, die von CDIAC zur Verfügung gestellten Messungen der Komponenten des CO2 Zyklus durch ein Modell zu beschreiben. Dies erfolgte (begutachtet) erstmalig mit der hier besprochenen Arbeit der Autoren. Das Journal der Veröffentlichung verfolgt die „Open“-Linie, d.h. die Publikation ist frei verteilbar.

Grundlegendes zum CO2 Zyklus

In der Fachliteratur wird Kohlenstoff (C) an Stelle von CO2 verwendet. Die Äquivalenz ist wie folgt: 1 ppm CO2 in der Luft entspricht 2,12 Gigatonnen Kohlenstoff (GtC) [2]. So ist z.B. die aktuelle atmosphärische CO2 Konzentration von 400 ppm dem Wert von 848 GtC in der Atmosphäre äquivalent. Hier wird im Folgenden sowohl CO2 als auch C verwendet. CO2 ist zwar schwerer als Luft, aber nur ein Spurengas, so dass es sich nicht am Boden anreichert sondern bis etwa 15 km Höhe homogen verteilt ist. Nur tausendfach höhere CO2 Konzentrationen reichern sich am Boden an und können z.B. bei Vulkanausbrüchen gefährlich werden.
Der Kohlenstoffgehalt der Weltmeere beträgt 37000 GtC [3], also mehr als das Vierzigfache der Luft mit ihren aktuell 848 GtC. Zwischen Luft, Ozean und Biosphäre findet ein ununterbrochener starker CO2 Austausch statt (CO2 Bruttoflüsse). Dieser verschob aber vor 1750, abgesehen von kleineren Schwankungen, nicht das natürliche Gleichgewicht. So flossen und fließen nach wie vor jährlich etwa 80 GtC zwischen Ozean und Luft sowie 120 GtC zwischen Biosphäre und Luft hin- und her, ohne dass dies vor 1850 wesentlich veränderte Kohlenstoffinhalte von Ozean, Luft oder Biosphäre verursachte. Ein informative Abbildung aller beteiligten Kohlenstoff-Flüsse zeigt die Grafik von Bild 1, die noch zum Jahr 2012 gehört. In dieser Grafik sind die natürlichen Flüsse schwarz, die anthropogenen rot. Alle anderen Flüsse sind dagegen vernachlässigbar, insbesondere auch der Vulkanismus von nur 0,1 GtC pro Jahr, der immer wieder von Laien irrtümlich als entscheidender „Zyklus-Joker“ ins Spiel gebracht wird.

Bild 1: Jährliche Kohlenstoffbrutto-Flüsse in GtC/a, Quelle IPCC, WG1AR5, Chapter 06 final, S. 471

Der industrialisierte Mensch begann ab etwa 1750 zum erstenmal in das natürliche CO2 Gleichgewicht einzugreifen, ab 1850 wurde dieser Eingriff dann spürbar. So emittiert der Mensch aktuell (2015) rund 11 GtC pro Jahr, wovon, wie schon erwähnt, grob die Hälfte in die Atmosphäre geht

und die andere Hälfte zu etwa gleichen Teilen vom Ozean und der Biosphäre aufgenommen wird. Der hierdurch bewirkte stärkere Pflanzenwuchs der Erde, der die Welternährungslage signifikant verbesserte, ist inzwischen gut bekannt [14, 15, 16]. Es ist klar, dass die anthropogenen CO2 Mengen als Nettoflüsse das natürliche Gleichgewicht des globalen CO2 Zyklus verändern. Der steigende CO2 Gehalt der Luft zeigt es.

Unser Modell des anthropogen geprägten CO2 Zyklus

Die entscheidende Eigenschaft unseres Modells, mit der es sich von den bisher bekannten Modellen unterscheidet, besteht darin, dass es nur die Netto-Flüsse von CO2 betrachtet. Nur diese verändern das Gleichgewicht des CO2 Zyklus. Diese Beschränkung hat den entscheidenden Vorteil, ohne Daten der Ozeanchemie oder Messungen des Brutto-CO2-Austauschs auszukommen.
Das Modell ist einfach und bringt dennoch die maßgebenden Zyklusbestandteile in beste Übereinstimmung mit den Messungen. Sogar die spärlichen und weniger genauen Messwerte der Periode von 1850 bis 1959 werden noch befriedigend wiedergegeben. Somit liegt nunmehr eine erstaunlich gute Übereinstimmung über mehr als 160 Jahre vor. Unser Modell ist kein empirischer Fit sondern aus physikalischen Gesetzmäßigkeiten hergeleitet. Man darf aus diesem Grunde sowie wegen der guten Wiedergabe der Messungen erwarten, dass das Modell auch noch die nächsten 100 Jahre seine Gültigkeit beibehält. Unter dieser Prämisse und mit allen Kaveats ergeben sich mit unserem Modell Obergrenzen des CO2 in der Atmosphäre, die in keinem Fall – auch bei Verbrennen aller verfügbaren Kohlereserven der Menschheit – überschritten werden. Das Modell erlaubt ferner die Aussage, wie lange es dauert, bis eine Störung des natürlichen CO2 Zyklus, wie sie aktuell durch anthropogenen CO2 Emissionen entsteht, von der Natur wieder ausgeglichen wird.
Die erste physikalische Gesetzmäßigkeit des Modells entspricht dem Massenwirkungsgesetz der Chemie. Ihr liegt die Näherung zugrunde, dass sich durch menschgemachte CO2 Emissionen zwar der CO2 Partialdruck der Atmosphäre ändert, praktisch nicht aber der des Ozeans – was am sehr viel höheren CO2 Inhalt des Ozean liegt. Der in den Ozean hineingedrückte Kohlenstoff-Nettofluss ist proportional zur Partialdruckdifferenz von Luft und Ozean und wird durch die lineare Gleichung (2.1) ausgedrückt. „Tau“ in (2.1) ist ein Modellparameter, der unabhängig von den CDIAC Daten bereits von anderer Seite grob bekannt ist [13]. Die zweite Grundannahme fordert einen CO2 Nettofluss in die Biosphäre, proportional zum entsprechenden Nettofluss in die Atmosphäre. Diese Annahme ist sinnvoll, weil höhere CO2 Konzentrationen der Luft in linearer Näherung höheres Pflanzenwachstum bewirken. Die Annahme wird durch zahlreiche Veröffentlichungen gestützt wie z.B. [14, 15, 16] und ist in Gleichung (2.2) mit „b“ als zweitem Modellparameter formuliert. Über „b“ kann ohne weiteres allenfalls nur eine extrem grobe Schätzung abgegeben werden. Zu (2.1) und (2.2) kommt schließlich noch das Gesetz der Massenerhaltung der Gleichungen (2.3) und (2.4) hinzu.
Aus den Gleichungen (2.1)-(2.4) folgt durch einfache Umformung die

Differentialgleichung (2.7) (DGL). Der in (2.7) versuchsweise noch zusätzlich eingeführte Term der Meerestemperatur S_a(t) hat später praktisch keinen Einfluss auf die Ergebnisse und kann daher entfallen. Die Ableitung der integrierten Größe N_a(t) in (2.7) ist der jährliche Netto-Kohlenstoff-Fluss in die Atmosphäre. Die numerische Lösung ist in den Abschnitten 4. und 5. der Arbeit beschrieben.
Das Modell benötigt als einzige Eingangsgröße die anthropogenen jährlichen Kohlenstoffemissionen. Ferner ist zur Lösung der Modell-DGL (2.7) ein Anfangswert der atmosphärischen CO2 Konzentration erforderlich. Für die Lösung der DGL werden als Zeitschritte Jahre verwendet. Die Lösung liefert als Ergebnisse den jährlichen Netto-Kohlenstoffeintrag in die Atmosphäre, den Ozean und die Biosphäre. Diese Werte integriert liefern die CO2 Mengen, die in die genannten Senken über viele Jahre gehen. Von den integrierten Größen ist insbesondere der CO2 Gehalt der Atmosphäre interessant.
Die Werte der zwei Modellparameter werden in unserer Arbeit mit der nichtlinearen SIMPLEX-Methode nach dem Kriterium der besten Anpassung an die CDIAC Messwerte berechnet. Wir betonen, dass die Parameter nur aus den Messwerten des Zeitraums 1959 bis 2013 ermittelt werden und dennoch das Modell auch den Zeitraum von 1850 bis 1959 gut wiedergibt. Dies zeigt, dass eine Einbeziehung der vielen möglichen Detailprozesse unnötig ist und zur Beschreibung und Voraussagbarkeit nichts beitragen kann.

Ergebnisse für den CO2 Zyklus von 1850 bis heute

Sie finden sich in Fig. 1 und Fig. 2 der Arbeit (die Messwerte stets in rot). In Fig. 1 oben stellt die schwarze Line den berechneten CO2 Gehalt der Atmosphäre dar, die grüne Kurve die jährlichen anthropogenen Kohlenstoff-Emissionen. Da die optimalen Parameter aus dem Vergleich mit den Messwerten über den Zeitbereich 1959- 2013 ermittelt wurden, sind die Ergebnisse der frühen Periode 1850 – 1959 nicht ganz so gut wie für 1959 – 2013. Fig. 1 unten zeigt die Airborne Fraction (AF) als den Bruchteil der anthropogenen Kohlenstoff- Emissionen, der in die Atmosphäre geht. Da es sich bei der AF nicht um eine integrierte Größe handelt, ist insbesondere die Schwankung ihrer Messwerte beträchtlich. Dennoch sind auch über 160 Jahre keine längerfristigen Änderungen der AF zu erkennen.
Fig. 2 zeigt die Ergebnisse der integrierten Größen, für den Kohlenstoffgehalt der Luft N_a, für den CO2 Gehalt des Ozeans N_s und für den der BiosphäreN_b. Da für N_s und N_b keine Anfangswerte bekannt sind, wurden diese beliebig festgelegt. Es kommt nur auf den Zeitverlauf dieser Größen an. Die anderen Teilbilder zeigen die jährlichen CO2 Netto-Zuwächse, die heftig schwanken. Diese Schwankungen sind vermutlich von jahreszeitlich bedingtem unterschiedlichen Pflanzenwuchs und weiteren Faktoren verursacht. Die integrierten Größen werden dagegen praktisch perfekt wiedergegeben.

Ergebnisse für den zukünftigen Zyklus bis 2100

In der Literatur sind Emissionsszenarien bis zum Jahre 2100 veröffentlicht. Wir verwendeten die in [20] zur Verfügung gestellten sechs Szenarien. Um das Modell zu testen, verlängerten wir sie bis zum Jahre 2150 mit der etwas willkürlichen Annahme einer linearen Abnahme auf den jeweils halben Wert des Jahres 2100. Die Szenarien und ihre zugehörigen Modellergebnisse sind in Fig. 3. gezeigt. Interessant ist dabei, dass das ungünstigste Szenario A1Fi schon weit mehr Kohlenstoffverbrennung erfordert als es alle Kohlenstoffreserven der Erde zusammen. Dennoch erreicht der CO2 Gehalt der Luft nur im Jahre nur einen Maximalwert von weniger als 800 ppm. Der Grund dafür wird im rechten unteren Teilbild der Airborne Fraction AF deutlich. Die AF beginnt abzunehmen und wird irgendwann Null – danach sogar negativ, wenn die anthropogene CO2 Zufuhr schwächer wird. Mit anderen Worten: es kommt ein Zeitpunkt, an dem die Partialdruckdifferenz zwischen Atmosphäre und Ozean so groß geworden ist, dass kein menschgemachtes CO2 mehr in die Luft sondern in Ozean und Biosphäre geht.

Vergleich mit Teilergebnissen anderer Modelle

In der Literatur findet sich ein Vergleich für ein numerisch-theoretisches „Experiment“ [7]. In diesem wird im Jahre 2010 ein Impuls von 100 GtC den anthropogenen Emissionen hinzuzugefügt und danach die anthropogenen Emissionen konstant auf 10 GtC pro Jahr festgehalten. In Fig. 4, oberes Teilbild, gibt die graue Zone den Ergebnisbereich der in [7] verwendeten 15 Modelle an. Die blaue Kurve ist das Ergebnis unseres Modells. Das untere Teilbild von Fig. 3 zeigt den Modellvergleich bis zum Jahre 3000.
Die Diskrepanz zwischen unserem Modell und den 15 anderen Modellen rührt im Wesentlichen von unserer Nichtberücksichtigung des Revelle-Effekts (hier) her. Dieser Effekt wird mit Ozeanchemie begründet und fordert eine verminderte CO2 Aufnahmefähigkeit bei steigender CO2 Konzentration der Luft. Der Revelle-Effekt zeigt sich aber bisher nicht in den Messungen (s. Fig. 1 unteres Teilbild). Dieser Mangel wird auch in einer weiteren Arbeit betont [13]. Solange der Revelle-Effekt in der globalen Natur nicht gemessen wird, ist er hypothetisch. Mögliche Gründe, warum er sich nicht zeigt, werden in unserer Publikation erwähnt.
Die Modelle in [7] und unsere Arbeit zeigen gleichermaßen ein recht langes Abklingen des 100 GtC – Impulses. Die Halbwertszeit dieses Abklingens AT beträgt in unserem Modell etwa 100 Jahre und wird von einem eigenen weiteren numerischen „Experiment“ bestätigt (Fig. 3 unteres linkes Teilbild, rote Kurve). AT ist die Anpassungs-Halbzeit, die die Natur benötigt, um eine Störung des natürlichen Kohlenstoffzyklus zur Hälfte zu beseitigen. Davon zu unterscheiden ist die Verweilzeit RT eines CO2 Moleküls in der Atmosphäre, die nur etwa 5 Jahre beträgt [8]. Der Grund für den extrem kleinen Wert der RT verglichen mit dem sehr großen Wert der AT ist der bereits beschriebene, um mehr als eine Größenordnung höhere Bruttoaustausch von CO2 zwischen Atmosphäre, Ozean und Biosphäre verglichen mit den CO2 Netto-Flüssen.

Die Historie unserer Arbeit

Die Grundzüge des Modells hat Prof. Werner Weber von der theoretischen Physik an der Universität Dortmund anlässlich eines gemeinsamen Kolloquiums des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) und EIKE in Potsdam im Oktober 2010 vorgetragen. Weil W. Weber sein Modell nicht weiterverfolgte, kontaktierte ich (Lüdecke) ihn und schlug eine Zusammenarbeit vor. Diese zog sich mit langen Unterbrechungen über mehrere Jahre hin und hatte als schönstes Resultat das Entstehen einer intensiven persönlichen Freundschaft. Wir telefonierten nicht selten oft mehrere Stunden wöchentlich – nicht nur über Physik. In den letzten Monaten dieser Zeit schloss sich Prof. Carl Otto Weiss unserem Team an. Während des Entwurfs einer gemeinsamen Veröffentlichung im Jahre 2014 verstarb Weber unerwartet. Eine erste Version der Arbeit erschien in „Earth System Dynamics Discussion“ (ESDD) (hier), wurde aber für ESD nicht angenommen. Die hier vorgestellte Publikation ist eine verbesserte Version der abgelehnten Einreichung.