

Kohlenstoffkreislauf

Peter Bützer

„Ich habe immer die Natur bewundert. Aber ich weiss, dass nur die Wissenschaft uns helfen kann, die Schäden, die selbstverständlich durch uns in der Welt entstehen, einigermassen zu korrigieren.“

Karl R. Popper britischer Erkenntnisphilosoph

Inhalt

1	Einleitung/Theorie.....	1
2	Aufgabenstellung	3
3	Simulation, Lösung	5
3.1	Simulationsdiagramm (Typ 1)	5
3.2	Zeitdiagramm	6
3.3	Dokumentation (Gleichungen, Parameter).....	6
4	Vergleich der Messdaten mit der Simulation.....	7
5	Interpretation	7

1 Einleitung/Theorie

Der Kohlenstoffkreislauf ist ein weltweiter Kreislauf des Kohlenstoffs. Dazu gehören das Kohlendioxid (CO_2) und weniger wichtig das Methan (CH_4) der Atmosphäre, Kohlenstoff als Carbonat (CO_3^{2-}) und Bicarbonat (HCO_3^-) in den Ozeanen. Auf dem Festland tritt Kohlenstoff in gebundener Form in grossen Lagern von Kalk (CaCO_3), Dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) und anderen Carbonaten auf. Ausserdem ist Kohlenstoff Bestandteil fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Der Kohlenstoff, der im Humus des Bodens vorhanden ist, wird schneller in den Kohlenstoffkreislauf eingebunden als in die anderen Kohlenstoffspeicher¹.

Einen wichtigen Kohlenstoffspeicher bilden die Lebewesen (Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen) selbst. Sie setzen bei der Atmung ständig Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid frei. Grüne Pflanzen binden diesen wieder bei der Photosynthese. Hier bilden Wasserkreislauf, Kohlenstoffkreislauf und Sauerstoffkreislauf ein verflochtenes Kreislaufsystem. Man geht davon aus, dass in einem intakten



Die Tanne, welche CO_2 bindet, steht auf einem Felsen aus Kalk, aus CaCO_3 (Kärnten)

¹ D.h. es braucht im Mittel etwa 30 Jahre, bis das gesamte Kohlenstoffinventar von Biomasse und Humus einmal zirkuliert worden ist. Dazu werden nur 0.023% der einfallenden Sonnenstrahlung benötigt.

Ökosystem die Stoffbilanz durch die Stoffwechselprozesse Photosynthese und biologische Oxidation der Produzenten, Konsumenten und Destruenten, aber auch der vulkanischen Prozesse und der Austauschprozesse der Ozeane ausgeglichen ist und sich in einem dynamischen Gleichgewicht befindet. Unter erhöhten CO_2 Konzentrationen kann Plankton in den Meeren bis zu 39 Prozent mehr Kohlenstoff binden². Ein Teil des Kohlenstoffs wird über teilweise sehr lange Zeiträume in Gewässern und Ablagerungen zwischengelagert. Die chemische Bindung von Kohlenstoff in die Lithosphäre erfolgt über die Bildung von Sedimentgesteinen (überwiegend Karbonaten) und als feinverteilt organisches Material, das aus den Überresten abgestorbener Organismen hervorgegangen ist, sowie als fossile Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas, Ölschiefer).

Bei der Bildung von Karbonatgesteinen sind oft Organismen mit ihren Kalkschalen beteiligt. Bei Hebungen von Gebirgen werden kohlenstoffhaltige Gesteine an der Erdoberfläche gebracht und der Witterung exponiert. Die dabei einhergehende Umwandlung des im Gestein gebundenen Kohlenstoffs in neue chemische Verbindungen bewirkt wiederum den Austausch von Kohlenstoff zwischen den Reservoiren des Kohlenstoffkreislaufs. Die Verwitterung von organischer Substanz aus Sedimentgesteinen bedingt die Bildung und Abgabe von CO_2 in die Atmosphäre. Die Verwitterung von Ca-Mg Silikaten entzieht der Atmosphäre CO_2 und führt es in gelöster Form (HCO_3^-) den Ozeanen zu. Die Diagenese und Metamorphose von Gesteinen führt zur Rückführung von CO_2 und CH_4 (Methan) in die Atmosphäre und Hydrosphäre, wo sie wiederum zum Einbau in Biomasse und für die Bildung von neuen Sedimentgesteinen zur Verfügung stehen.

Die Erde ist ein Wasserplanet. Wird es wärmer, beschleunigt sich der irdische Wasserkreislauf, die Bioproduktivität erhöht sich und die Bodenorganismen atmen vermehrt CO_2 aus. Dieses kann dann als „Treibhausgas“ die bereits von anderen Faktoren verursachte Erwärmung verstärken.

Der Kohlenstoffkreislauf ist nur drittrangig. Die Entwicklung des „Erdsystems“ wird in der Hauptsache vom Wasserkreislauf bestimmt. Dieser aber ist unendlich komplex. An zweiter Stelle folgt der Kreislauf des Sauerstoffs. Dieser rückt erst neuerdings etwas ins Blickfeld, weil festgestellt wurde, dass der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre sinkt.

Der Kohlenstoffkreislauf unserer Erde ist in vielen Arbeiten dargestellt. Die Diskussion um das CO_2 als Treibhausgas hat diese Verbindung mit Sauerstoff in der Ökologie und in der Politik in den Vordergrund gerückt (z.B. Kyoto-Protokoll³ zur Reduktion des CO_2 -Ausstosses).

² Riebesell U., Schulz K. G., Bellerby R. G. J., Botros M., Fritsche P., Meyerhöfer M., Neill C., Nondal G., Oschlies A., Wohlers J., Zöllner E., Enhanced biological carbon consumption in a high CO_2 ocean, Nature advance online publication 11 November 2007 | doi:10.1038/nature06267

³ Das Kyoto-Protokoll wurde 1997 von der 3. Vertragsstaatenkonferenz (COP) der Klimarahmenkonvention angenommen. In dem Protokoll verpflichten sich die Industriestaaten, ihre gemeinsamen Emissionen der wichtigsten Treibhausgase im Zeitraum 2008 bis 2012 um mindestens 5% unter das Niveau von 1990 zu senken. Dabei haben die Länder unterschiedliche Emissionsreduktionsverpflichtungen akzeptiert. Damit das Protokoll in Kraft treten kann, muss es von mindestens 55 Staaten ratifiziert werden, wobei diese mindestens 55% der CO_2 -Emissionen der Annex I-Länder von 1990 auf sich vereinigen müssen. Bislang (Stand: 29. September 2003) haben 119 Staaten ratifiziert, wodurch 44,2 % der CO_2 -Reduktionen der Industrieländer erbracht sind. Entscheidend ist die Ratifizierung durch Russland mit 17,4 % CO_2 -Emissionen; die Ratifizierung wird für 2012 erwartet.

2 Aufgabenstellung

Man versuche die experimentellen Daten der Messungen vom Mauna Loa Observatory, Hawaii zu simulieren.

Verwenden Sie die Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs nach Fischlin (Daten IPCC) und zeigen Sie, wie gut diese Daten mit den Messdaten übereinstimmen.

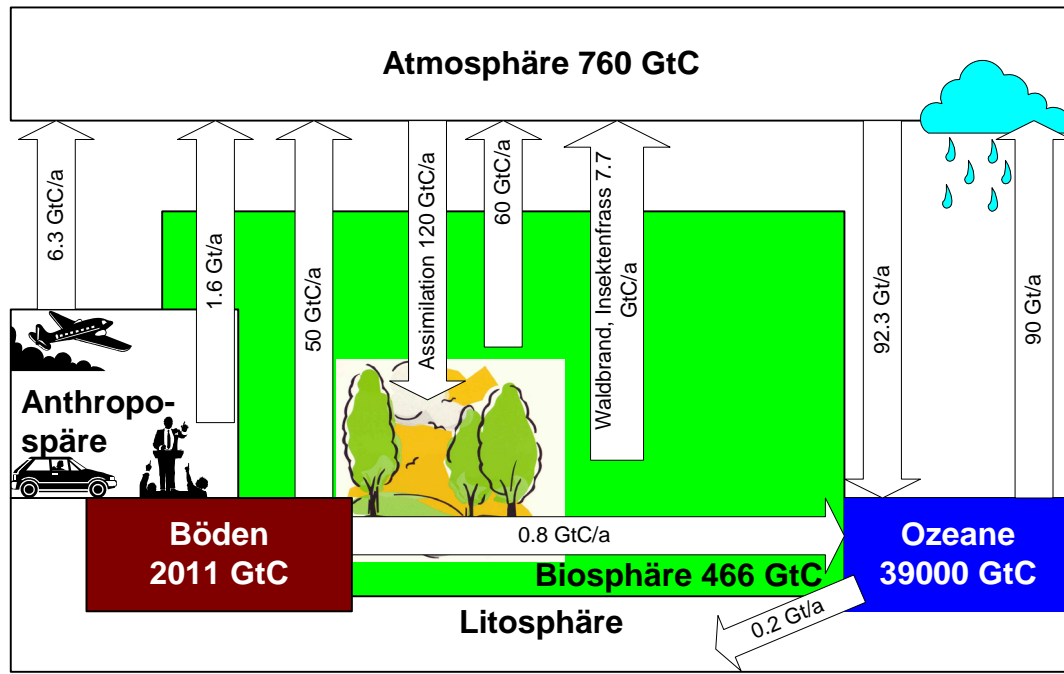


Tabelle 1: Messdaten der Kohlendioxid-Konzentrationen in der Atmosphäre (Mauna Loa Observatory, Hawaii)⁴

Jahr	CO ₂ -Messung (ppm)
1960	317
1970	326
1980	339
1990	354
2000	369
2001	371
2002	373
2003	376

⁴ Keeling C.D., Whorf T.P., Atmospheric CO₂ concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii, University of California, <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2>, 2004-08-02

Umrechnung von GtC in ppm CO₂

Ungefähre Höhe der Atmosphäre unter Normalbedingungen = 7,99 km (aufgerundet: 8 km).

$$V(\text{Atm.}) = V(\text{Erdkugel} + \text{Atm.}) - V(\text{Erdkugel}) \text{ (km}^3\text{)}$$

$$V(\text{Atm.}) = \frac{4}{3} (r + 8)^3 - \frac{4}{3} r^3$$

$$r (\text{Erde}) = 6.370 \cdot 10^3 \text{ km} \quad (r + 8) = 6.378 \cdot 10^3 \text{ km}$$

$$r^3 = 2.5848 \cdot 10^{11} \text{ km}^3 \quad (r + 8)^3 = 2.5945 \cdot 10^{11} \text{ km}^3$$

$$V(\text{Atm.}) = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \rho = 4.1888 \cdot 9.75 \cdot 10^8 \text{ km}^3$$

$$V(\text{Atm.}) = 4.08 \cdot 10^9 \text{ km} = 4.08 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$$

Volumen von 0.044 kg CO₂ unter Normalbedingungen: 22.4 Liter = 0.0224 m³

$$760 \text{ GtC} = 2.787 \cdot 10^{12} \text{ t} = 2.787 \cdot 10^{15} \text{ kg} \rightarrow 1.52 \cdot 10^{15} \text{ m}^3 \text{ CO}_2$$

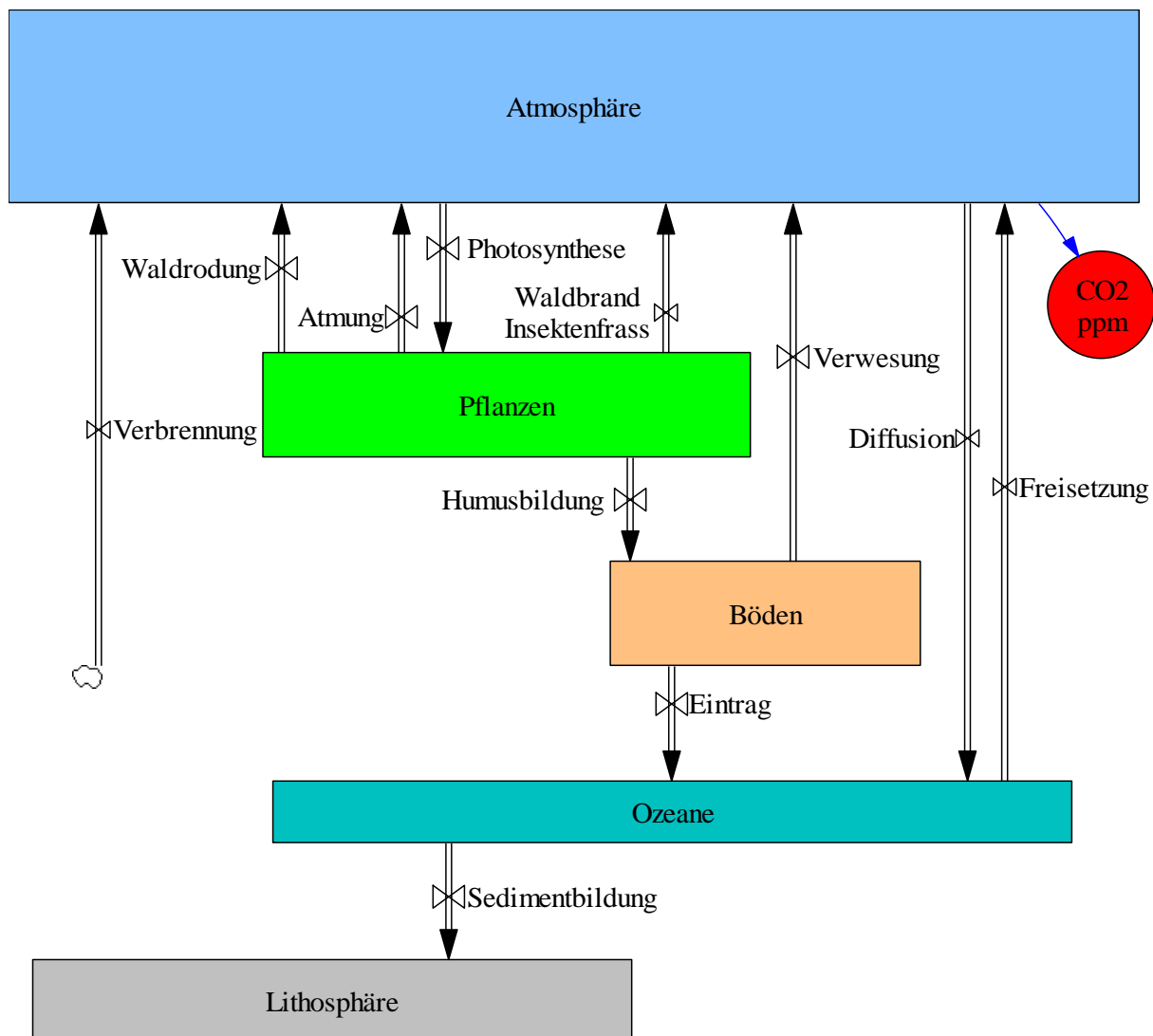
Volumenverhältnis: $1.52 \cdot 10^{15} / 4.08 \cdot 10^{18} = 3.72 \cdot 10^{-4}$ Umrechnung in ppm (106) \rightarrow 372 ppm

Umrechnungsfaktor: 760 GtC entspricht ca. 372 ppm \rightarrow Faktor 0.49

3 Simulation, Lösung

3.1 Simulationsdiagramm⁵ (Typ 1)⁶

Die Darstellungen in einfachen Biologie- und Chemie- Lehrbüchern zeigen die Reservoirs in Gigatonnen und die Stoffflüsse in Gigatonnen pro Jahr auf. Sie zeigen alle ein prinzipielles Bild, wie es nachfolgend dargestellt ist:



Eine gute Arbeit mit einem schrittweisen Aufbau einer Simulation hat Portscheller mit dem Programm Dynasys⁷ und detaillierte Studien habe Bice⁸ und Verona⁹, mit Stella veröffentlicht.

⁵ Simulations-Software: Vensim® PLE, Ventana Systems, Inc., <http://www.vensim.com/>

⁶ Bützer Peter, Roth Markus, Die Zeit im Griff, verlag pestalozzianum, Zürich 2006, S. 37

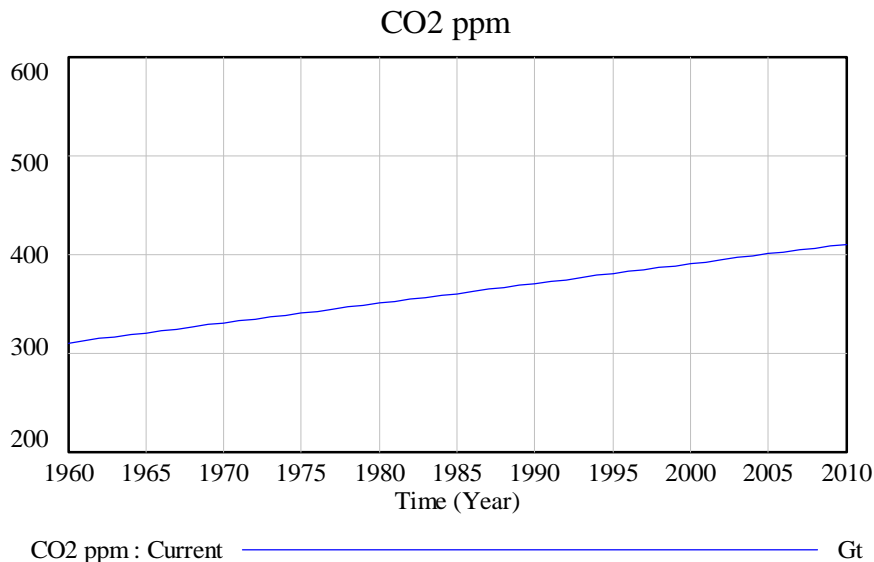
⁷ Portscheller P., Pflanzen schlucken unser CO₂?, <http://www.learn-line.nrw.de/angebote/neuemedien/medio/nw/biologie/co2/co201.htm>, 2004-08-02

⁸ Bice D., The Global Carbon Cycle, http://www.acad.carleton.edu/curricular/GEOL/DaveSTELLA/Carbon/carbon_intro.htm#intro, 2004-08-02

⁹ Verona M. E., Carbon Cycle. Maryland Virtual High School. mvhs1.mbhs.edu/mvhsproj/carbon/carbon.html, 2004-08-02

3.2 Zeitdiagramm

Die Simulation, mit dem obigen Simulationsdiagramm und den Inputdaten von Fischlin zeigt folgende Resultate:



3.3 Dokumentation (Gleichungen, Parameter)

- (01) Atmosphäre= INTEG(Atmung+Freisetzung+Verbrennung+Verwesung+
Waldrodung+Waldbrand Insektenfrass-Diffusion-Photosynthese, 760)
Units: Gt [600,760]
Fischlin, A. & Fuhrer, J., 2000. Die Klimapolitik bringt die
Wissenschaft Zum Zusatzartikel(Box): Das Klimaprotokoll von
Kyoto an ihre Grenzen - Die Herausforderung des Kyoto-Protokolls
für die Ökologie NZZ, Nr.262 (9.Nov.): 11
- (02) Atmung= 60
Units: Gt/Year [50,110]
Atmung der Pflanzen
- (03) Böden= INTEG (-Verwesung-Eintrag+Humusbildung, 2011)
Units: Gt [700,3000]
- (04) CO2 ppm= Atmosphäre/2.45
Units: Gt [300,1000]
Umrechnung von Gt auf ppm mit dem mittleren Volumen der
Atmosphäre, bei einem Start bei 310 ppm ist der Faktor 2.45
- (05) Diffusion= 92.3
Units: Gt/Year [91.7,104]
Aufnahme von Kohlenstoff als CO2 durch das Wasser
- (06) Eintrag= 0.8
Units: Gt/Year [0.2,0.8]
- (07) FINAL TIME = 2010
Units: Year
The final time for the simulation.
- (08) Freisetzung= 90
Units: Gt/Year [90,100]
Abgabe von Kohlenstoff als CO2 durch die Meere (Ozeane)
- (09) Humusbildung= 50
Units: Gt/Year
Blätter, Holz etc. wird zuerst zu Humus, bevor dieser verwest
- (10) INITIAL TIME = 1960

- Units: Year
The initial time for the simulation.
- (11) Lithosphäre= INTEG (+Sedimentbildung, 5000)
Units: Gt
- (12) Ozeane= INTEG (Diffusion-Freisetzung-Sedimentbildung+Eintrag, 39000)
Units: Gt [700,39000]
- (13) Pflanzen= INTEG (+Photosynthese-Atmung-Humusbildung-Waldrodung-
Waldbrand Insektenfrass, 466)
Units: Gt [466,827]
- (14) Photosynthese= 120
Units: Gt/Year [50,120]
Assimilation
- (15) SAVEPER = TIME STEP
Units: Year [0,?]
The frequency with which output is stored.
- (16) Sedimentbildung= 0.2
Units: Gt/Year
- (17) TIME STEP = 1
Units: Year [0,?]
The time step for the simulation.
- (18) Verbrennung= 7.9
Units: Gt/Year [5,7.7]
Vom Menschen industriell, gewerblich, häuslich freigesetzter Kohlenstoff
- (19) Verwesung= 50
Units: Gt/Year [30,60]
- (20) Waldbrand Insektenfrass=7.7
Units: Gt/Year [0,?]
- (21) Waldrodung= 1.6
Units: Gt/Year [0.1,3]
Durch den Menschen

4 Vergleich der Messdaten mit der Simulation

Jahr	CO ₂ -Messung (ppm)	Simulation	Fehler in %
1960	317	310	2.2
1970	326	330	1.2
1980	339	350	3.2
1990	354	370	4.5
2000	369	390	5.7
2001	371	392	5.7
2002	373	394	5.6
2003	376	398	5.9

5 Interpretation

Der Fehler dieser einfachen Simulation zu den gemessenen Daten ist nicht sehr gross. Versuchen Sie herauszufinden, welche Parameter wie viel geändert werden müssten, damit die Simulation mit den Messdaten besser übereinstimmt.

Eine Krümmung der Kurve ist noch nicht vorhanden, diese tritt aber erst auf, wenn die Quellen der CO₂-Produktion und die Aufnahme in die Senken zeitabhängig gemacht werden – je mehr CO₂ in der Luft, desto rascher die Photosynthese und desto rascher die Aufnahme in die Meere.