



# Solarbasierter Kohlenstoffkreislauf

Detlev Möller

Brandenburgische Technische Universität Cottbus  
Lehrstuhl für Luftchemie und Luftreinhaltung

11. Leibniz Conference „Solarzeitalter“ – Lichtenwalde, den 12.05.2011

In **einer Stunde** gelangt durch Solarstrahlung die Energiemenge auf die Erde, welche die Menschheit in **einem Jahr** aus fossilen Rohstoffen freisetzt, wobei die entsprechende Menge an fossilen Stoffen im Verlaufe **einer Million Jahre** gebildet wurde.

# Das Problem

Die **Zeitskalen** der menschlichen Nutzung von stofflichen Ressourcen und natürlichen Rezyklierung liegen um viele Größenordnungen auseinander (bei sehr kleinen Stoffflüssen ist das noch kein Problem).

Die **Nutzungsrate** liegt gegenwärtig in einer Größenordnung, die zu signifikanten irreversiblen Verschiebungen in Reservoirkonzentrationen führt (bei sehr kleinen Nutzungsraten ist das noch kein Problem).

Beide Faktoren zusammen führen zu einer Klimaänderung (**ABER**: erst die Folgen der Klimaänderung stellen **das Problem** dar).

# Die Fakten

Gegenwärtig werden jährlich fossile Rohstoffe im Äquivalent von ca.  $8 \cdot 10^9$  t C verbrannt (dazu kommen ca.  $2 \cdot 10^9$  t C aus Landnutzungsänderungen und anderen Quellen). Seit Beginn der Industriellen Revolution wurden insgesamt ca.  $600 \cdot 10^9$  t sequestrierter Kohlenstoff freigesetzt – 50% davon sind in der Atmosphäre akkumuliert, 35% im Ozean und der Rest in der terrestrischen Biomasse.

Zum Vergleich: Die globale Waldbiomasse beinhaltet ca.  $760 \cdot 10^9$  t C. Die Atmosphäre zum Beginn der Industriellen Revolution (300 ppm CO<sub>2</sub>) enthielt  $650 \cdot 10^9$  t C und nunmehr ca.  $950 \cdot 10^9$  t C.

Die globale Photosynthese bindet (Assimilation) jährlich ca.  $250 \cdot 10^9$  t C – dieselbe Menge wird aber jährlich wieder „verbrannt“ (Atmung); die Nettobilanz (NEP) ist vernachlässigbar klein. Die atmosphärische Verweilzeit des „biologischen“ CO<sub>2</sub> beträgt also ca. nur 3 Jahre. Die Verweilzeit des „menschlichen“ CO<sub>2</sub> hingegen mindestens 800 Jahre (weil die Senken sehr klein sind).

# Das globale biologische Kohlenstoff-Budget

$$NPP = GPP - R_{\text{photoautotroph}}$$

$$NEP = NPP - R_{\text{heterotroph}}$$

$$GPP \approx 200$$

50% Ozean  
50% Kontinent

$$NPP \approx 100$$

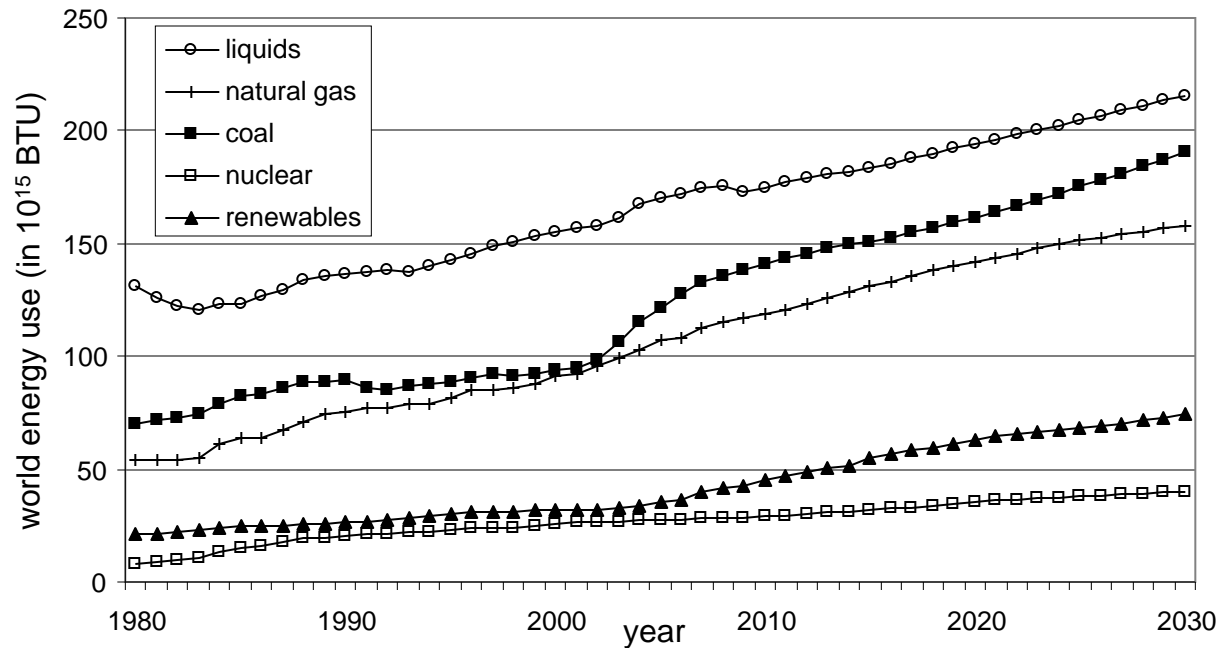
50% Ozean  
50% Kontinent

~ 10 Tiere  
2-5 Biomasseverbrennung  
□ 20 menschliche Nutzung  
~ 1 VOC Emission  
~ 30 Mineralisation

$$NEP = 1$$

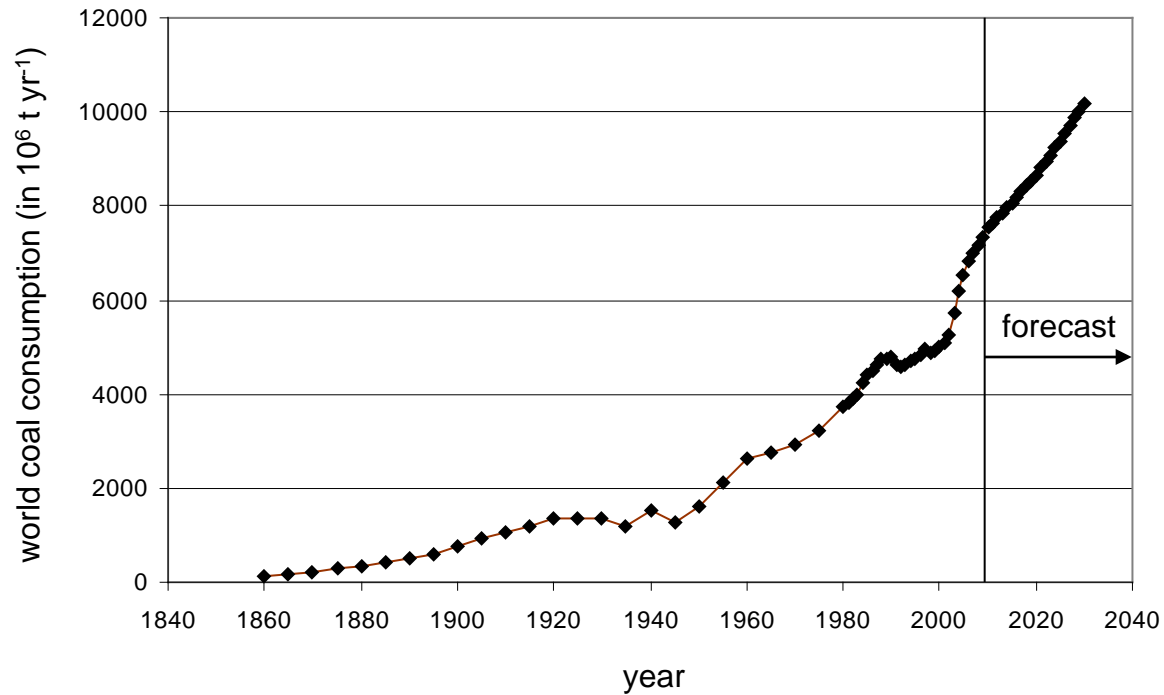
(Werte in  $10^{15}$  g C bzw. Gt C pro Jahr)

# Globaler Energieverbrauch nach Quellen

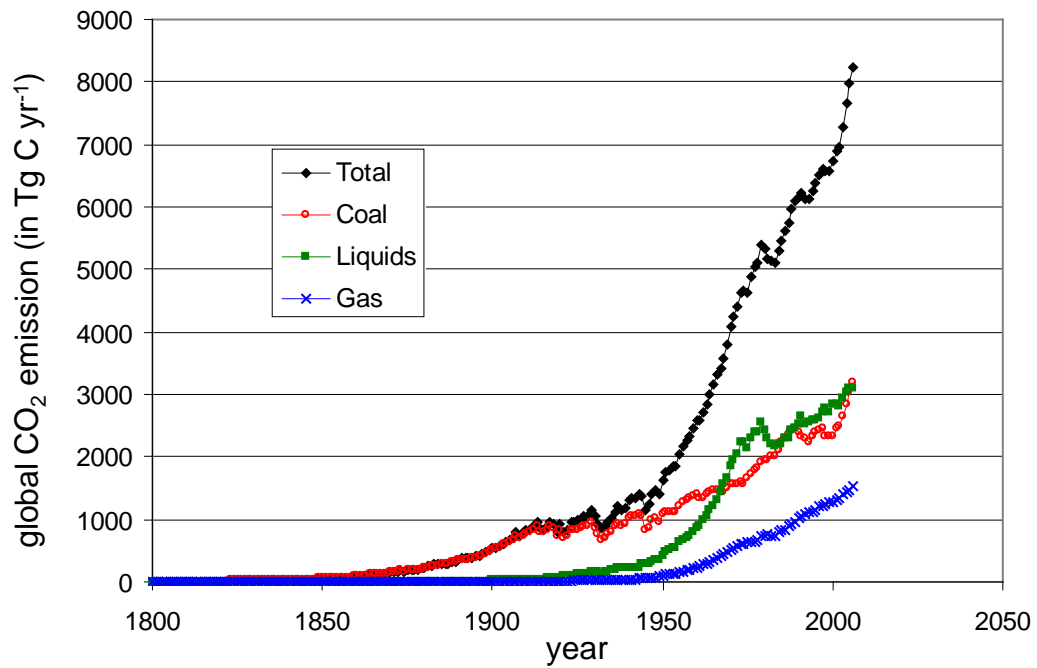


World production of fossil fuels, in Mt oil equivalent (toe); data from EIA (2009).

The IEA/OECD defines one toe to be equal to 41.868 GJ or 11630 kWh.



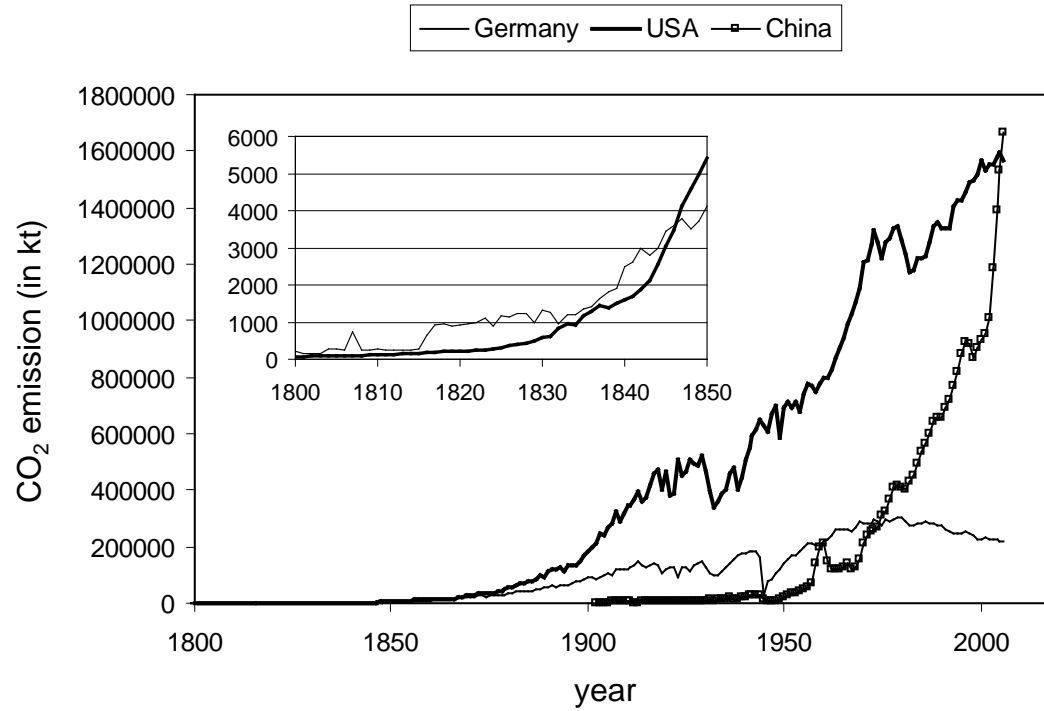
World coal consumption in  $\text{Mt yr}^{-1}$ . Data from 1860 until 1975 after Möller (2003); data since 1980 after EIA (2009)



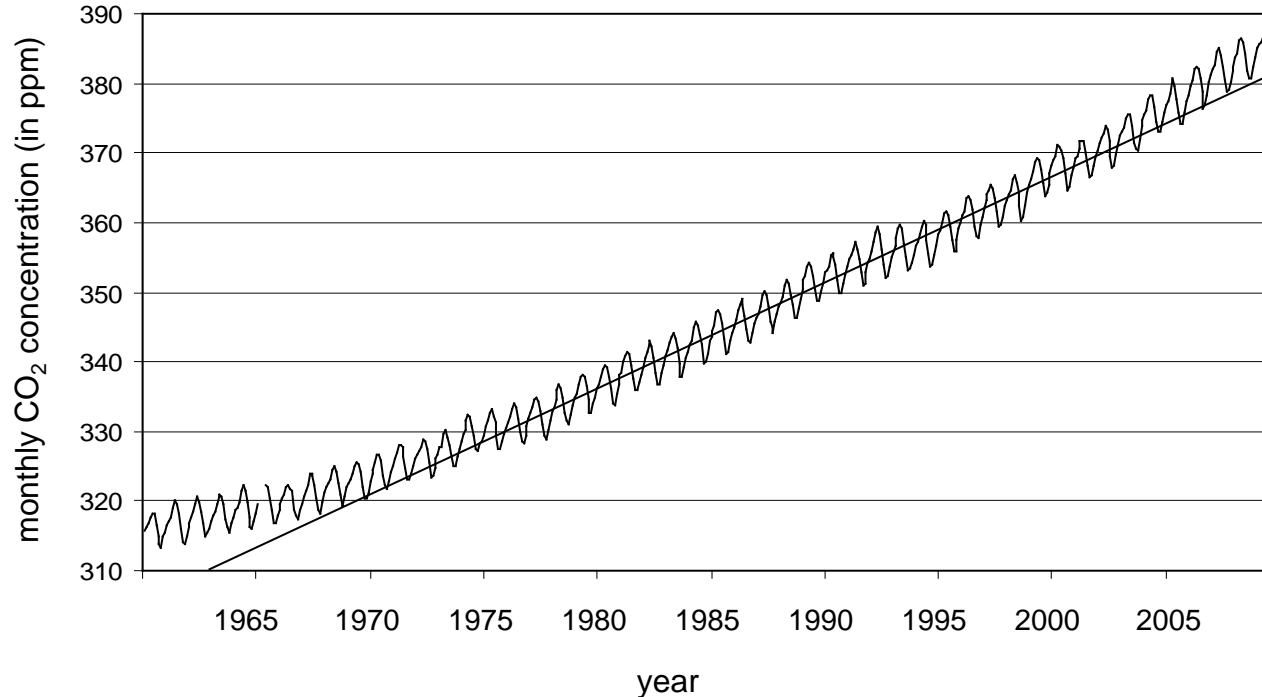
Global CO<sub>2</sub> emission Trend; data from Boden et al. (2009)



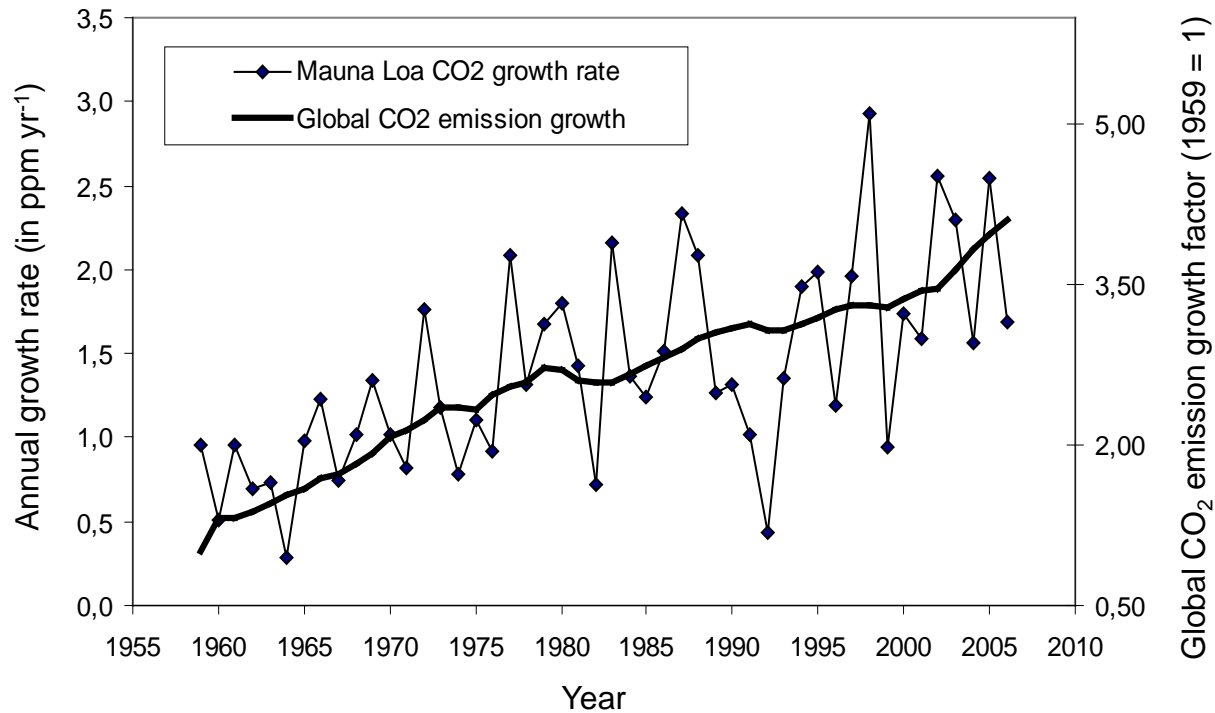
# Nationale CO<sub>2</sub>-Emissionen



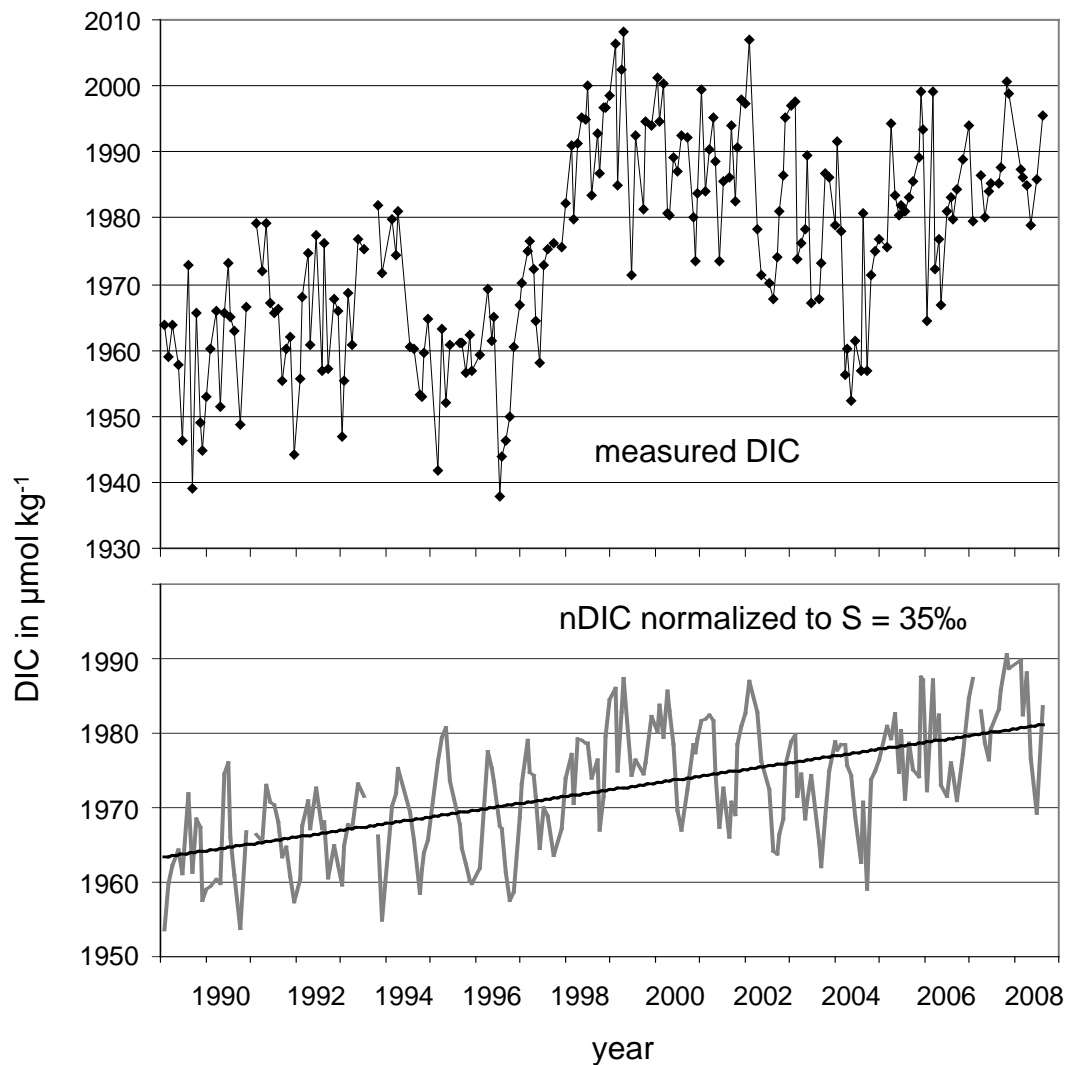
# Mauna Loa CO<sub>2</sub> Konzentration



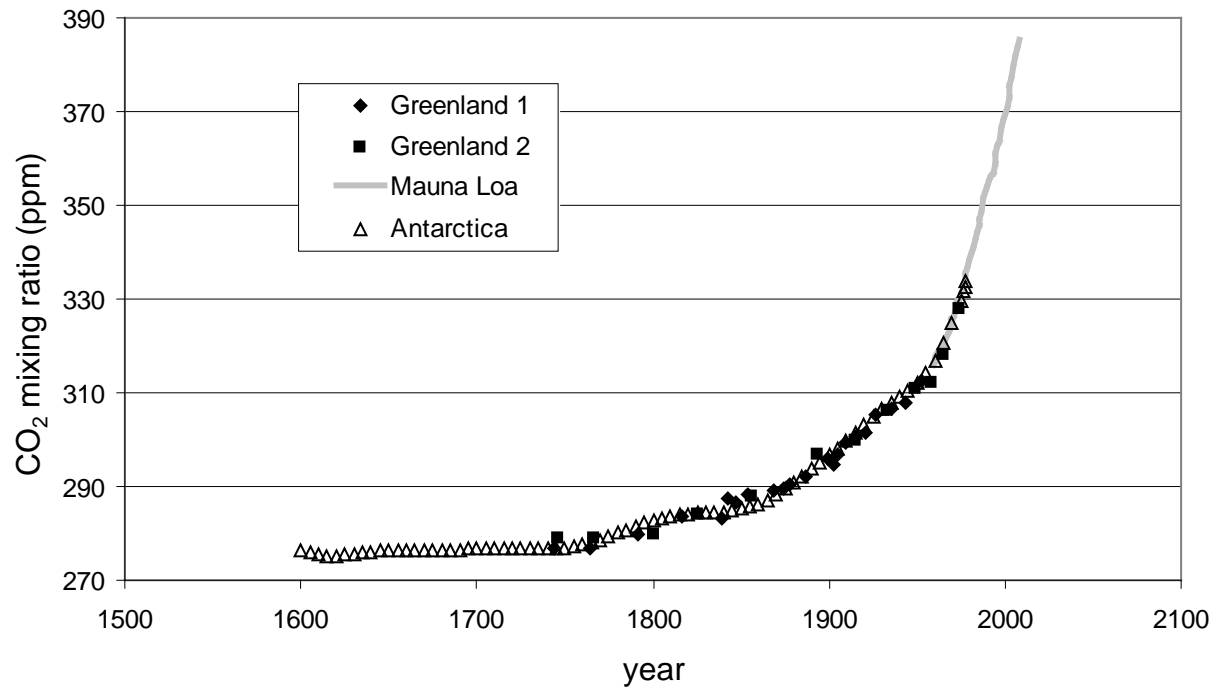
The *Keeling-curve*: 1959-2008 atmospheric CO<sub>2</sub> values (ppm) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa, Hawaii, USA; data from R. F. Keeling, S. C. Piper, A. F. Bollenbacher and S. J. Walker. Carbon Dioxide Research Group, Scripps Institution of Oceanography (SIO), University of California, La Jolla, California USA 92093-0444. The line represents a linear regression fit between 1970 and 2000



Annual mean rate of growth of CO<sub>2</sub> at Mauna Loa ( data from Dr. Pieter Tans, NOAA/ESRL; [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends)) and relative global CO<sub>2</sub> emission growth related to 1959 (= 1, corresponding to 2462 Gt C); data from Boden et al. (2009)

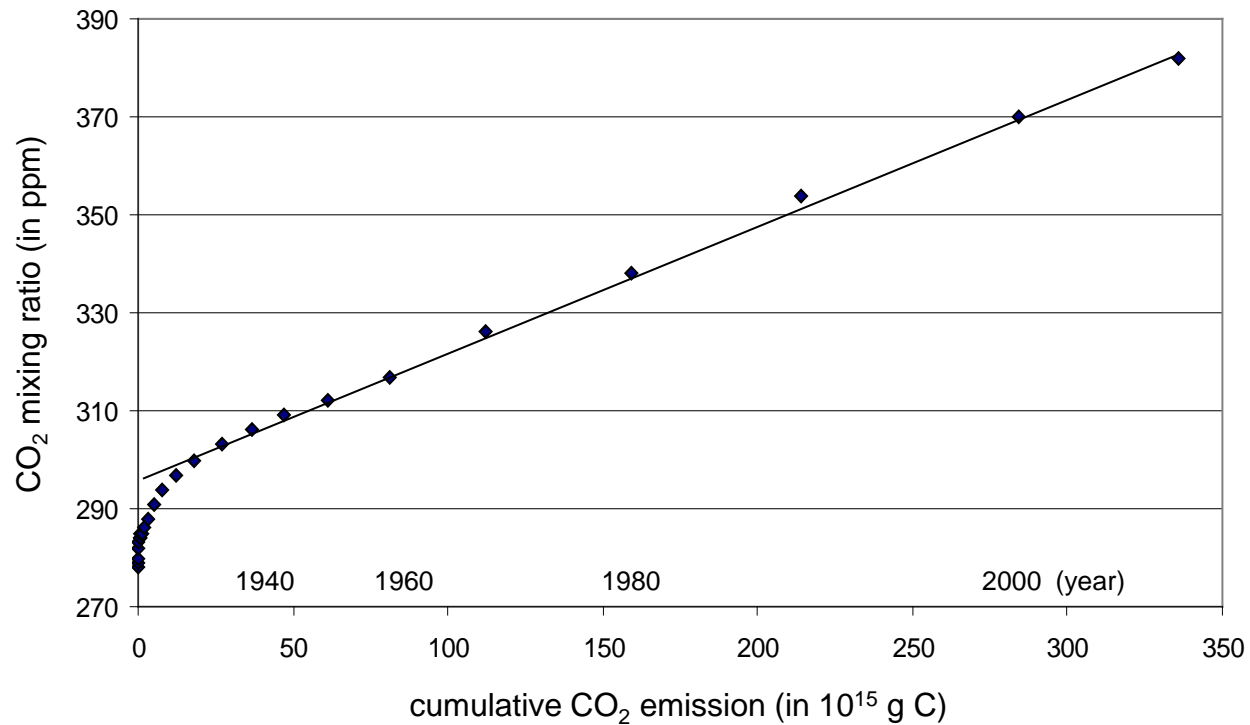


Trend of dissolved organic matter (DIC) at Station ALOHA); data from: Dore, J.E. 2009, Hawaii Ocean Time-series surface CO<sub>2</sub> system data product, 1988-2008, SOEST, University of Hawaii, Honolulu, HI, <http://hahana.soest.hawaii.edu/hot/products/products.html>. (see also Dore et al. 2003, 2009).

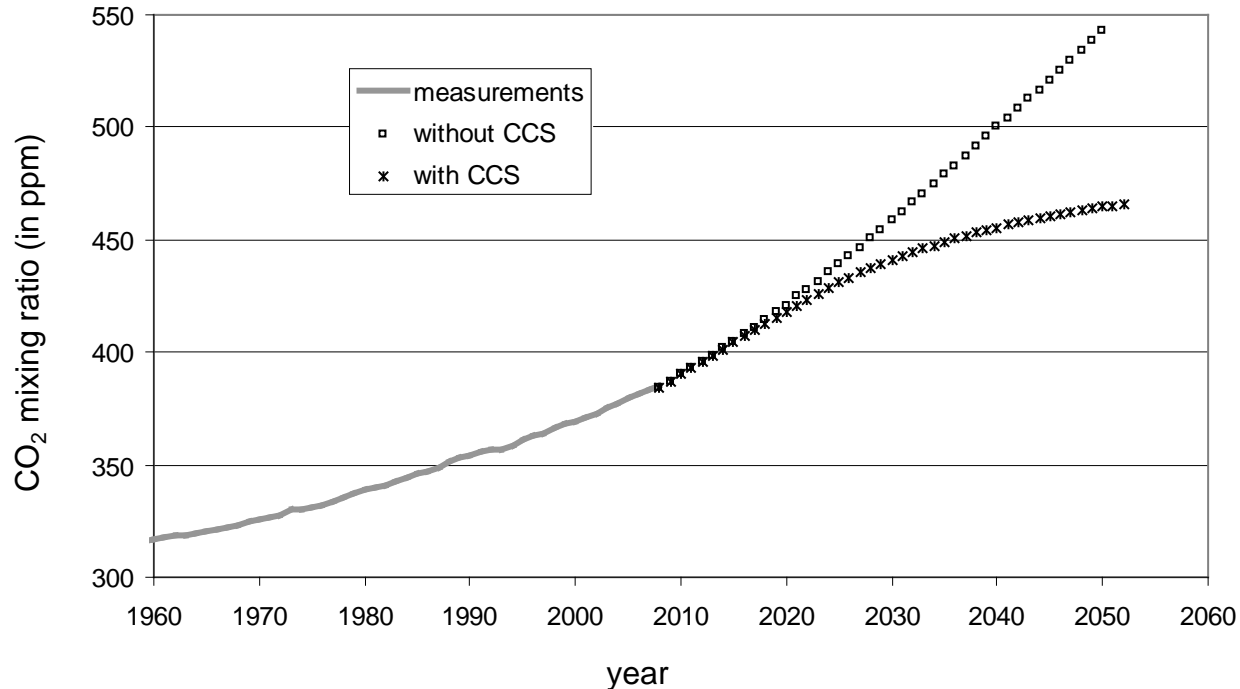


Historical CO<sub>2</sub> records from different ice cores and Mauna Loa in situ monitoring (in ppm): Law Dome, Antarctica, Mauna Loa annual means and two different ice cores from Greenland (core 1 see Neftel et al. 1994), core 2 see Friedli et al. 1986); data from A. Neftel, H. Friedli, E. Moor, H. Löttscher, H. Oeschger, U. Siegenthaler, and B. Stauffer (1994) Historical CO<sub>2</sub> record from the Siple Station ice core. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A

# Linearer Zusammenhang zwischen kumulativer CO<sub>2</sub>-Emission und atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration

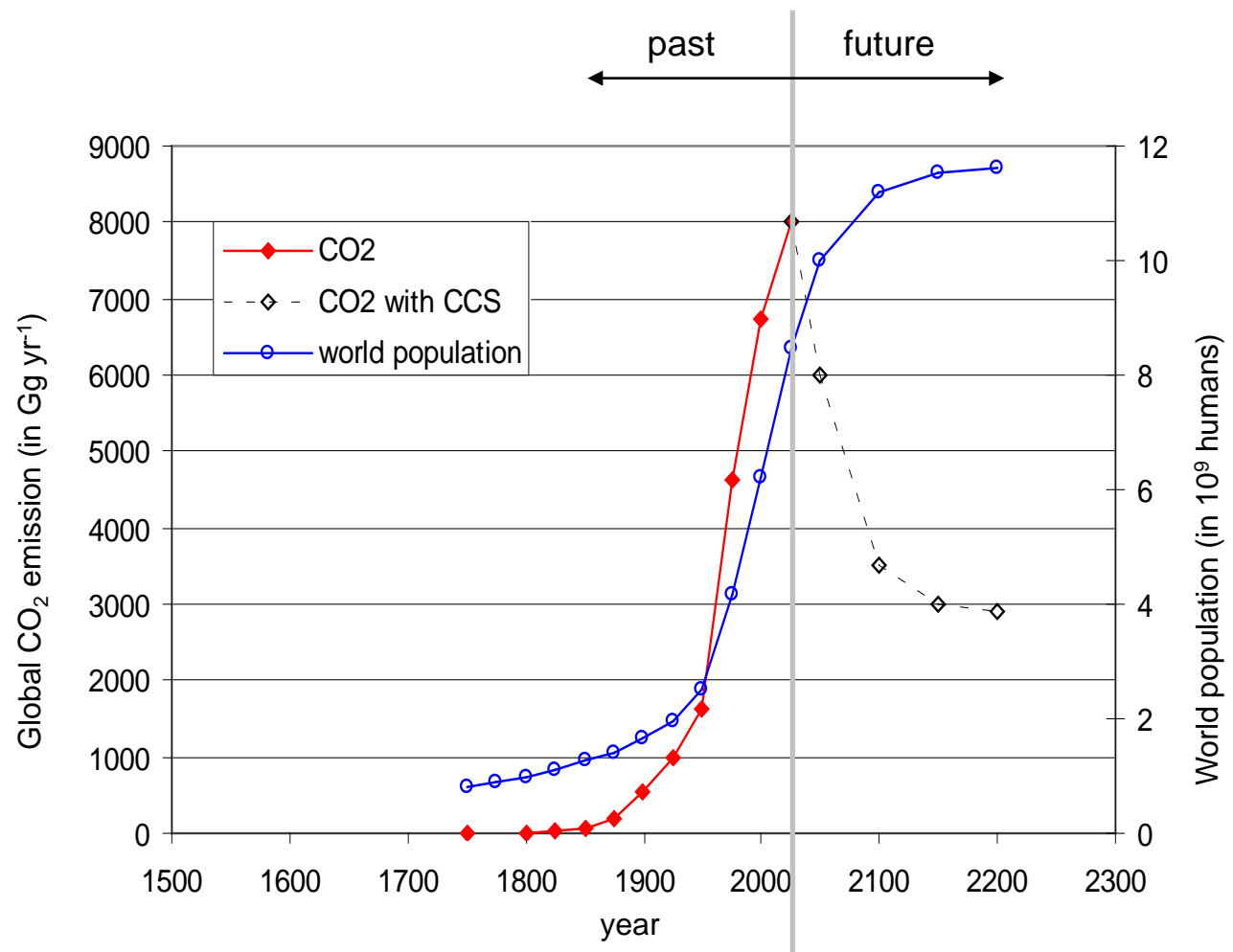


# Prognose der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration



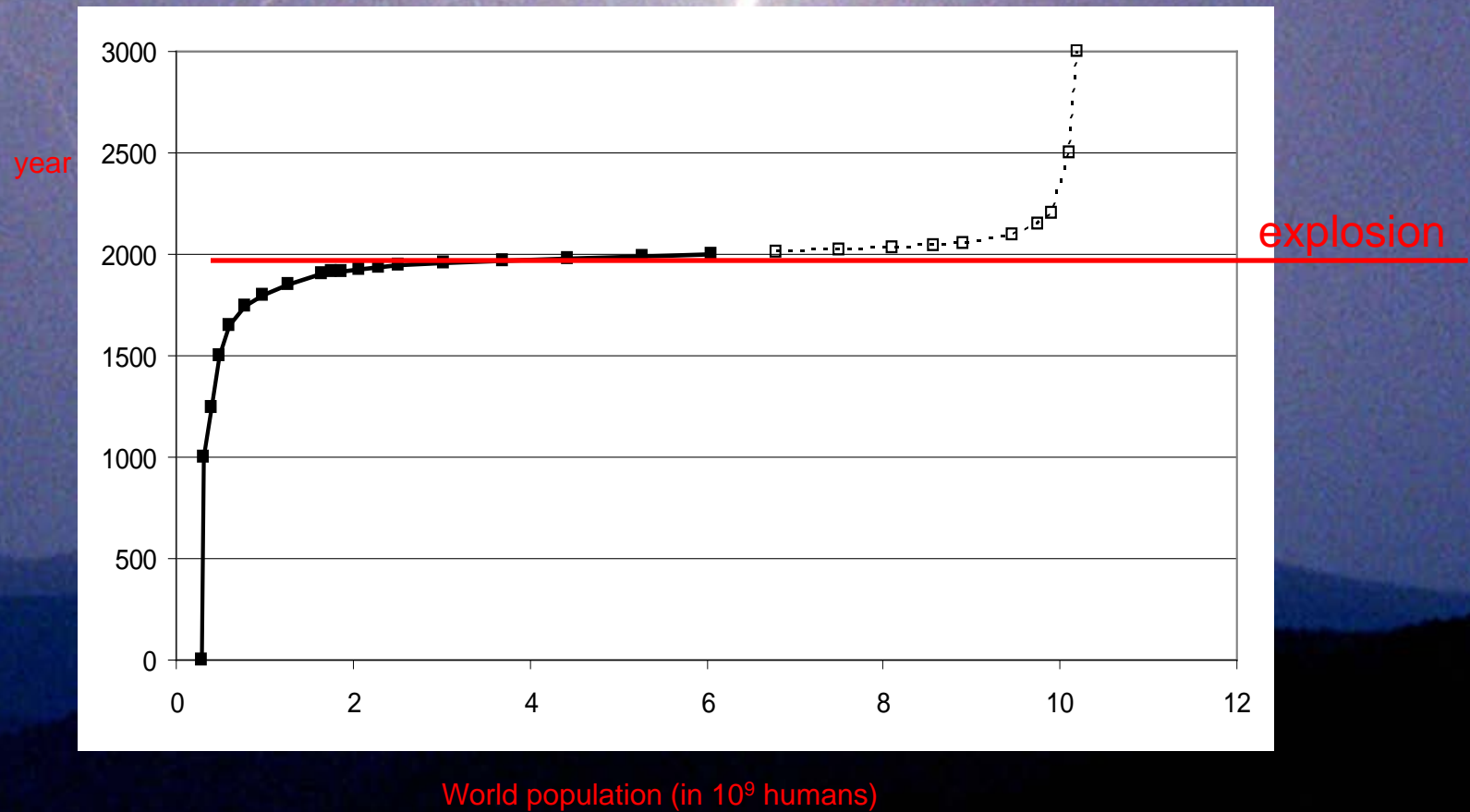
Two scenarios of future atmospheric CO<sub>2</sub> development:

- A further but slowing down increase of CO<sub>2</sub> emission (3% until 2020, then 2% until 2030 and further 1% growth); land use change and biomass burning 3 Gt CO<sub>2</sub>-C yr<sup>-1</sup> constant until 2040 and further 2 Gt CO<sub>2</sub>-C yr<sup>-1</sup>, no carbon capture; and
- The continuous increase of CO<sub>2</sub> emission, but with a faster slows down (3% until 2010, then 2% until 2015 and 1% until 2020), from 2020 carbon capture (1% yr<sup>-1</sup> increase until 2015 and then 5% yr<sup>-1</sup> until 2050).

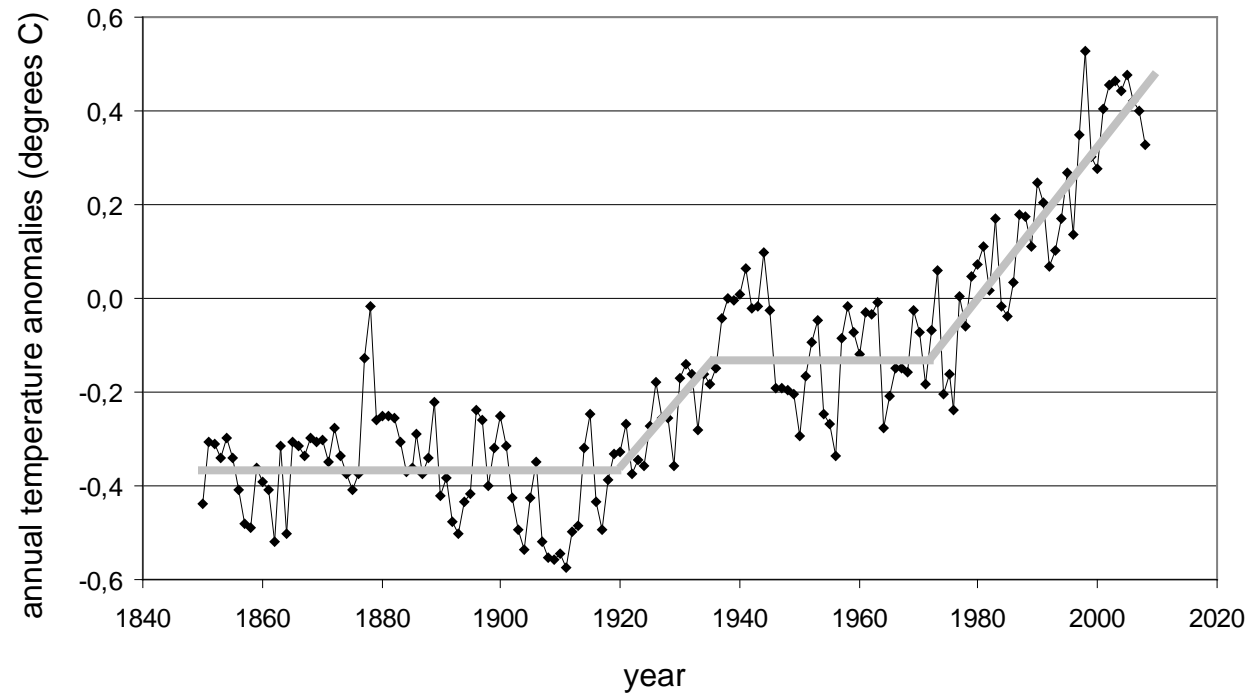


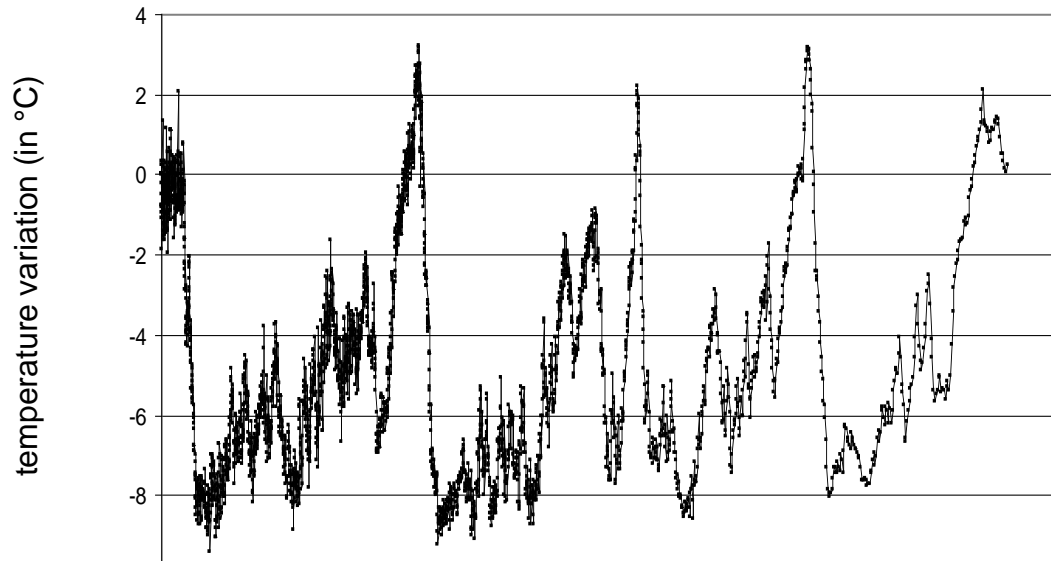


# Super-exponential growth of world population

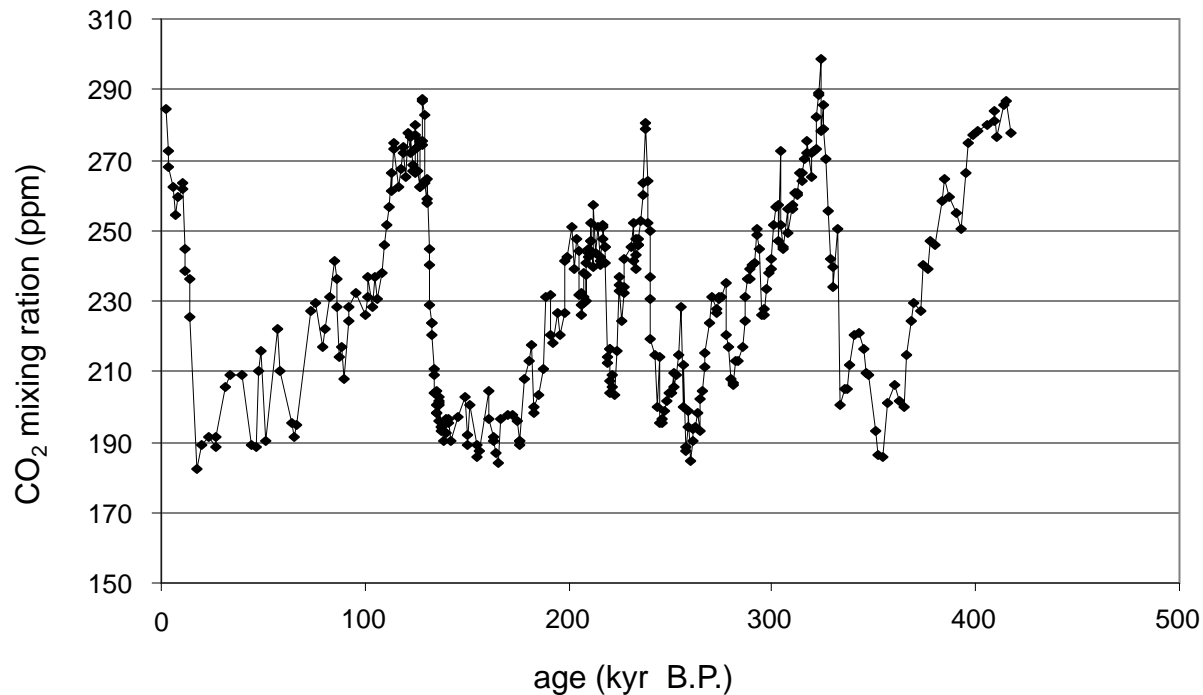


# Der globale Temperaturverlauf





Historical isotopic temperature record from the Vostok Ice Core. Source: Petit et al. (2000).



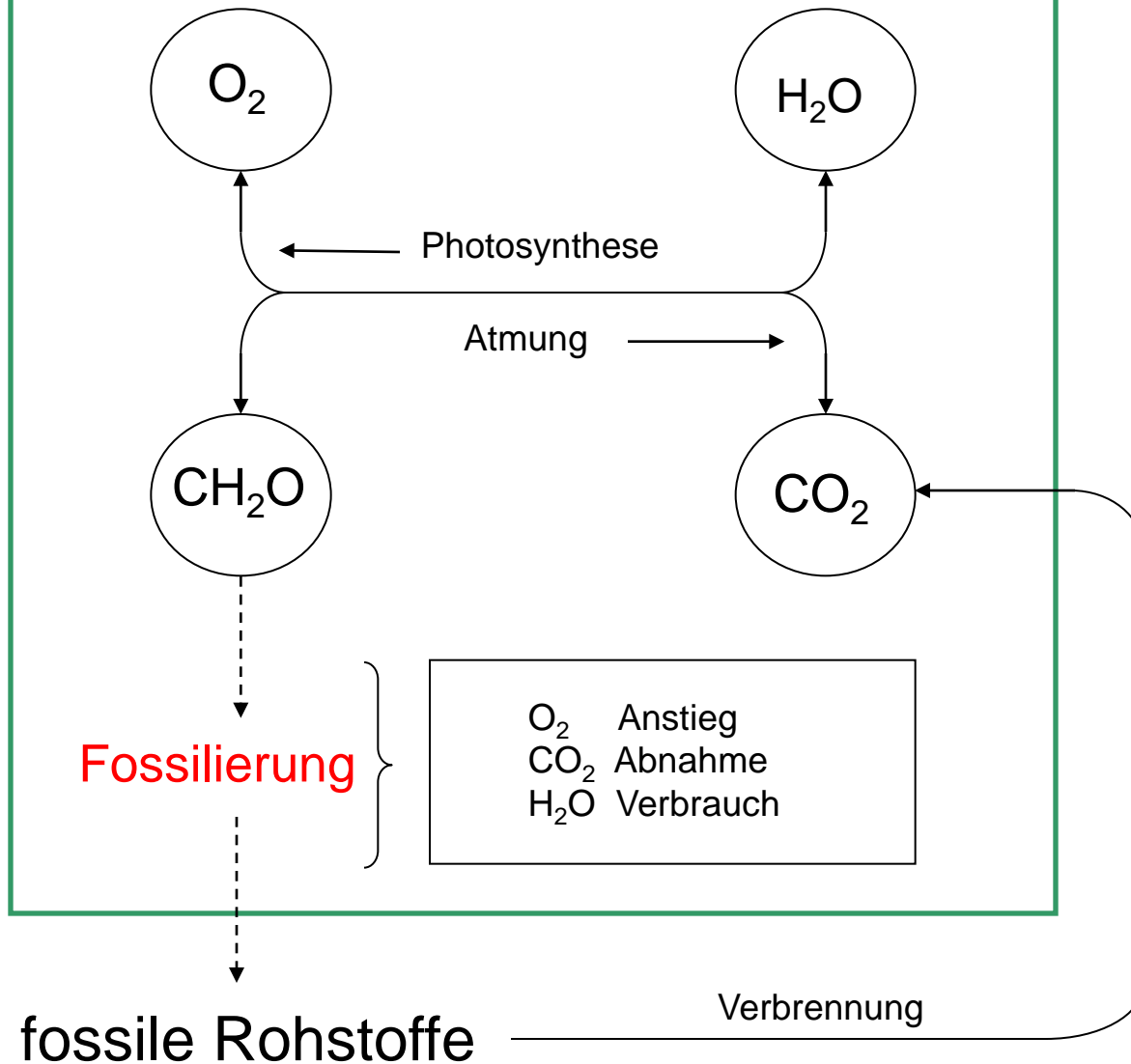
Historical CO<sub>2</sub> record from the Vostok Ice Core, Antarctica; data from Barnola et al. (2003).

## Die Lösung des Problems

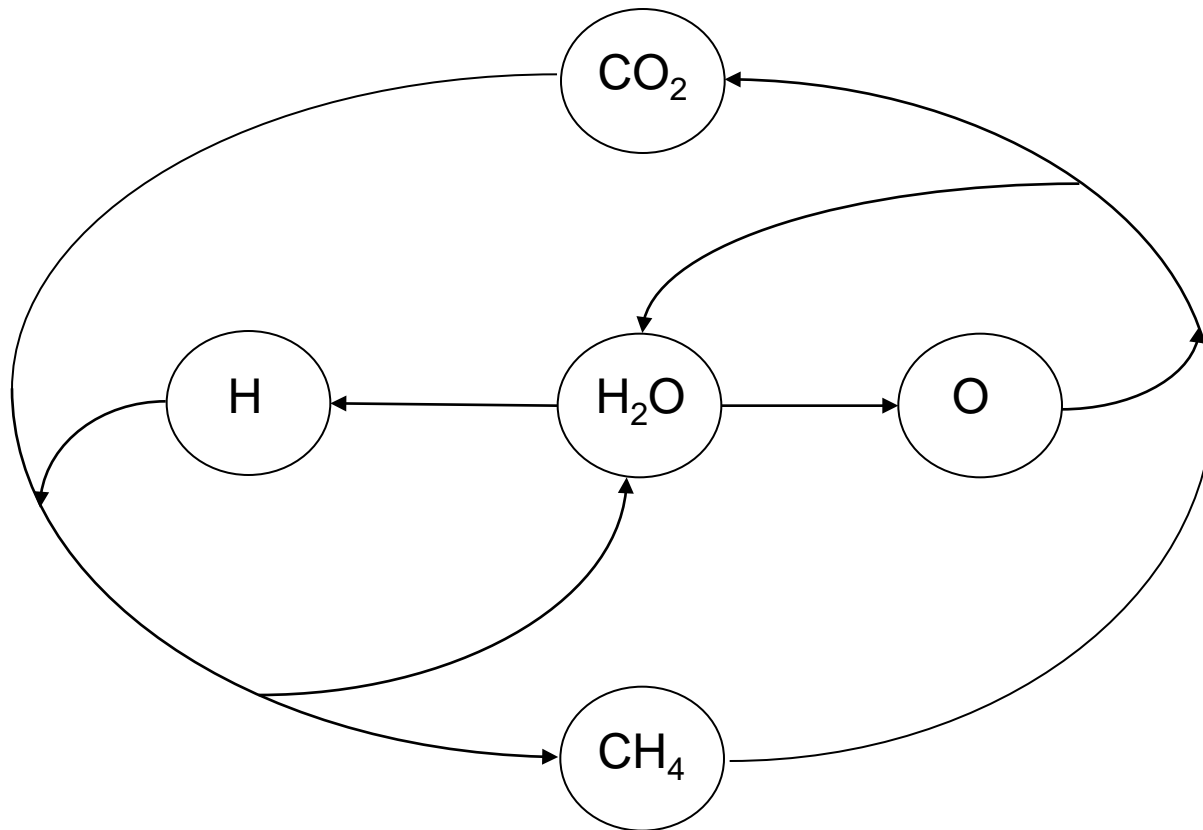
Jede stoffliche Nutzung natürlichen Ressourcen muss innerhalb eines **Kreislaufes** ablaufen, dessen **Zeitskala** dem des entsprechenden natürlichen Kreislaufes entspricht.

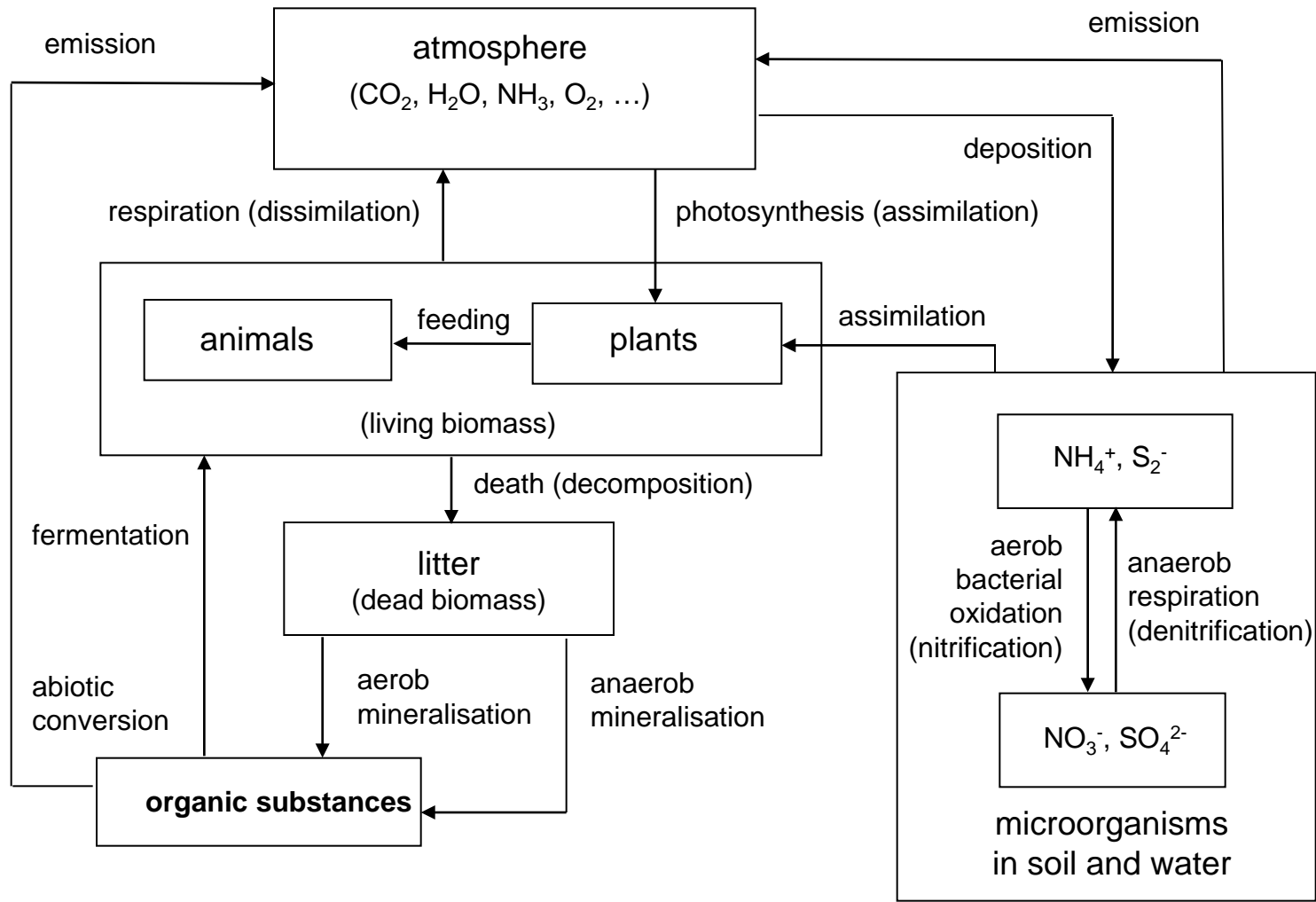
Es gibt **keine Begrenzung** der Nutzungsrate (Produktion), wenn die Entnahmerate (mit dem Ziel Sequestrierung und/oder Rezyklierung) gleich groß ist. Dann bleiben die Reservoirkonzentrationen (und damit das Klima) konstant.

# Der biologische Kohlenstoff-Kreislauf



# Der Kohlenstoff-Wasserstoff-Sauerstoff-Kreislauf



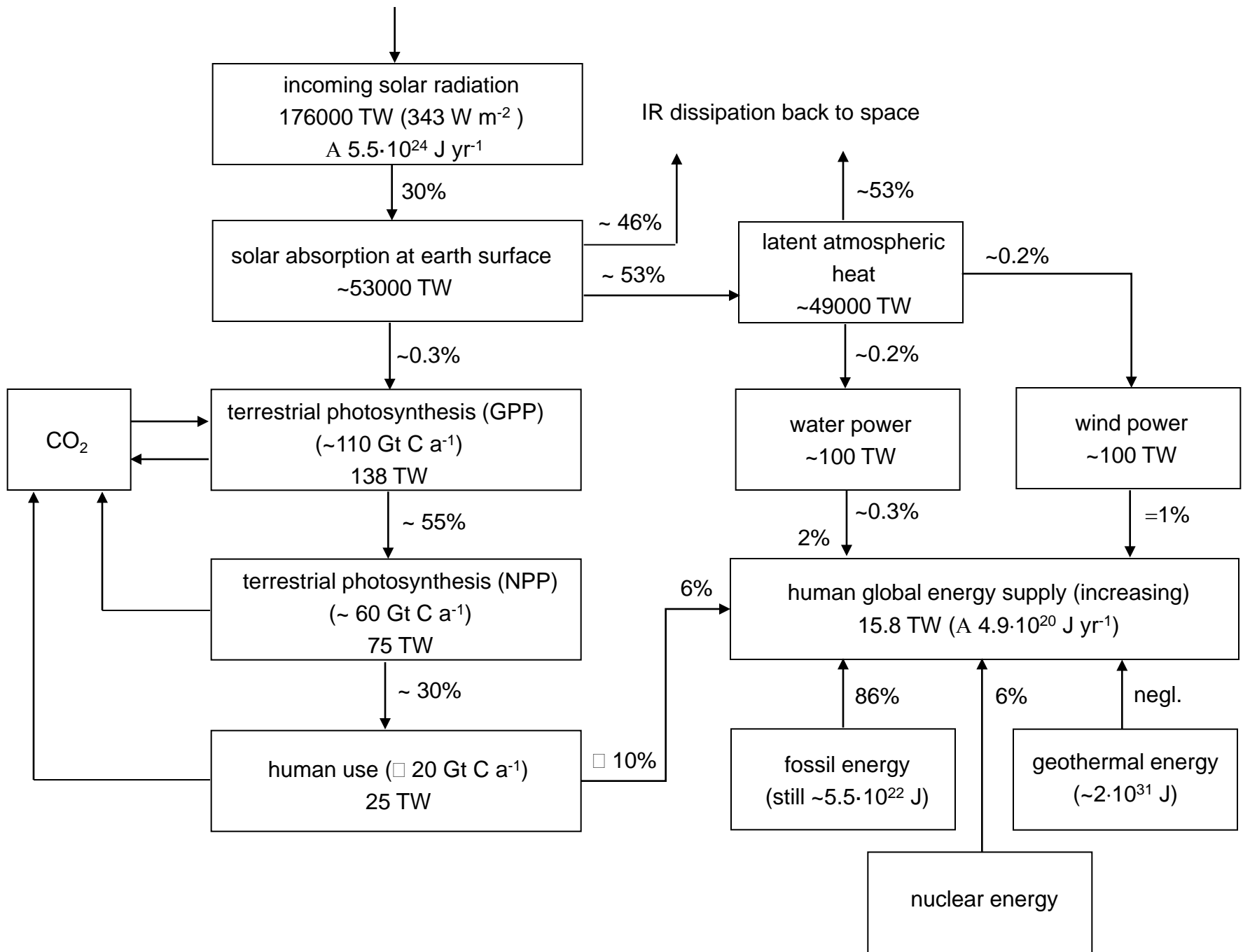


# Wo kommt die Energie her?

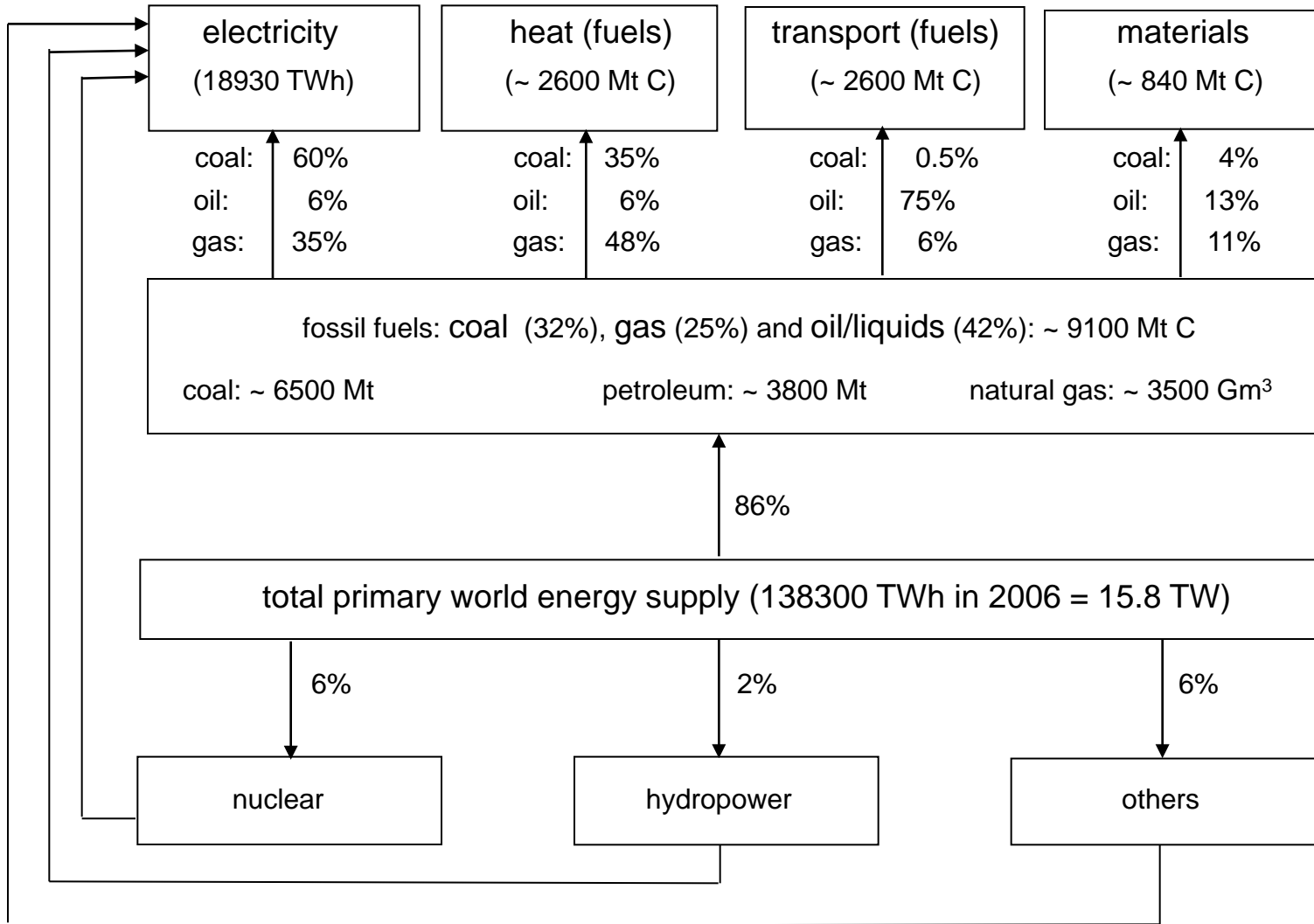
- ☹️ Gespeicherte chemische Energie (ursprünglich solare Strahlung)
- ☹️ Geothermische Energie (aus Kernspaltung und ggf. primordiale Wärme)
- ☹️ Gravitationsenergie
- 😊 Direkte (Strahlung) oder indirekte (Wind, Wasser, Biomasse) solare Energie (ursprünglich Kernfusionsenergie)

Es gibt keine erneuerbare Energie. Energie befindet sich im ständigen Fluss von höherem zu niedrigerem Potential.

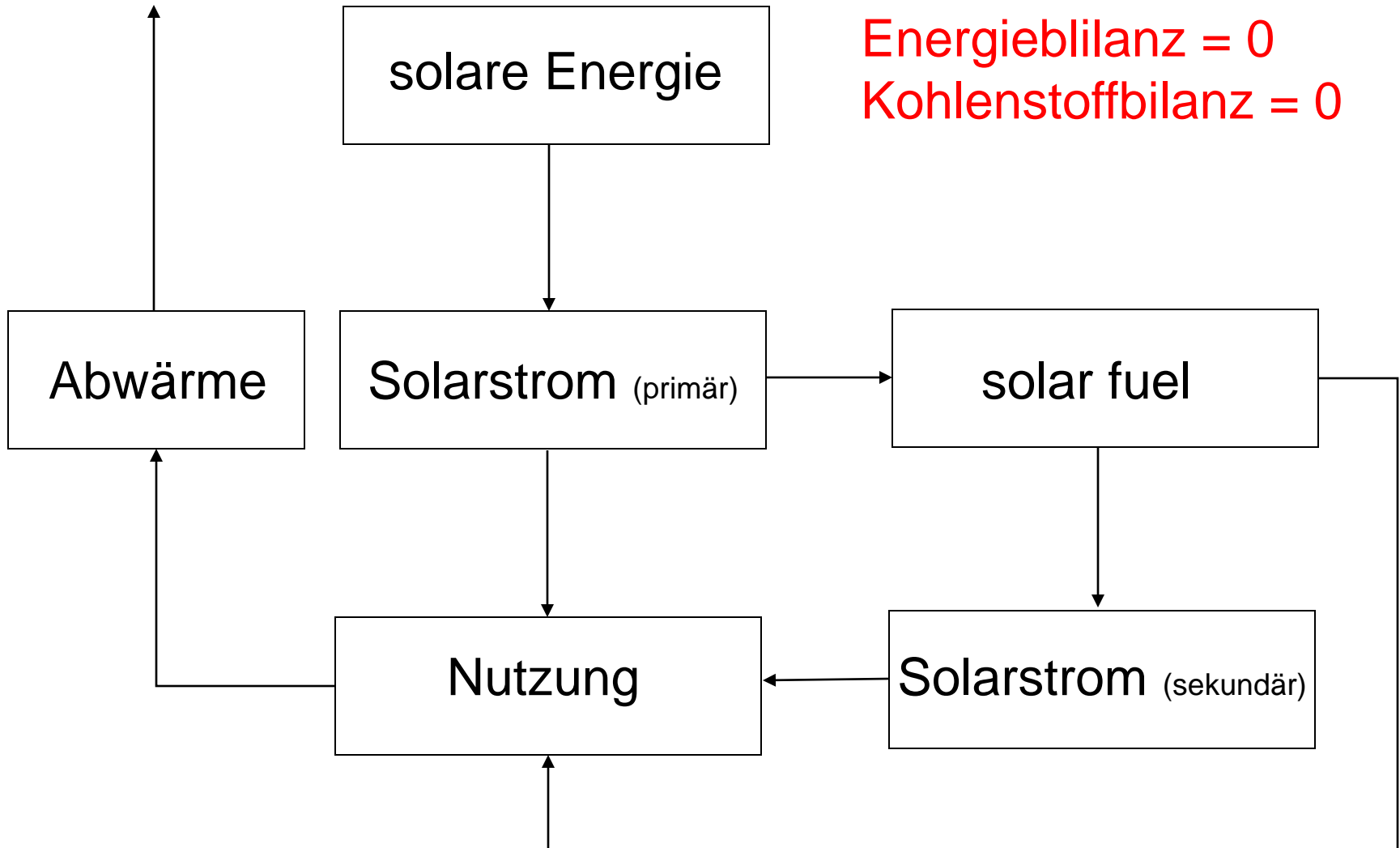




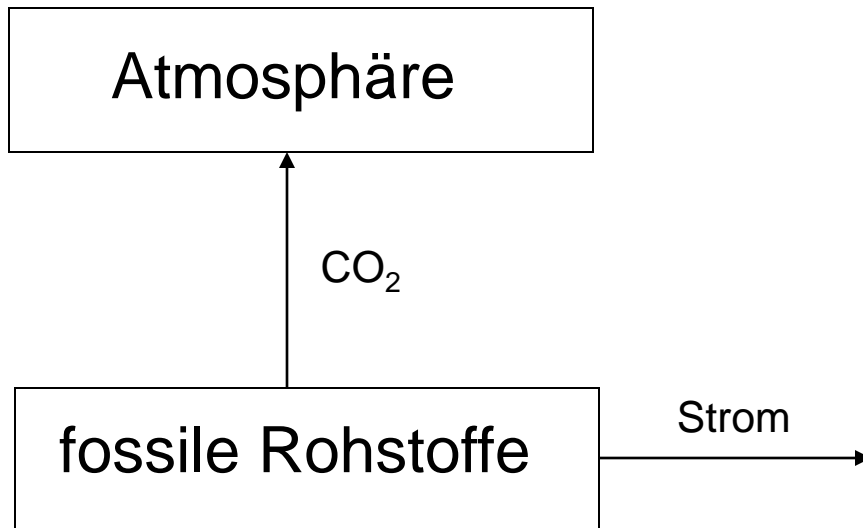
nuclear: 15%  
 hydropower: 16%  
 other: 2%



# Das Solarzeitalter



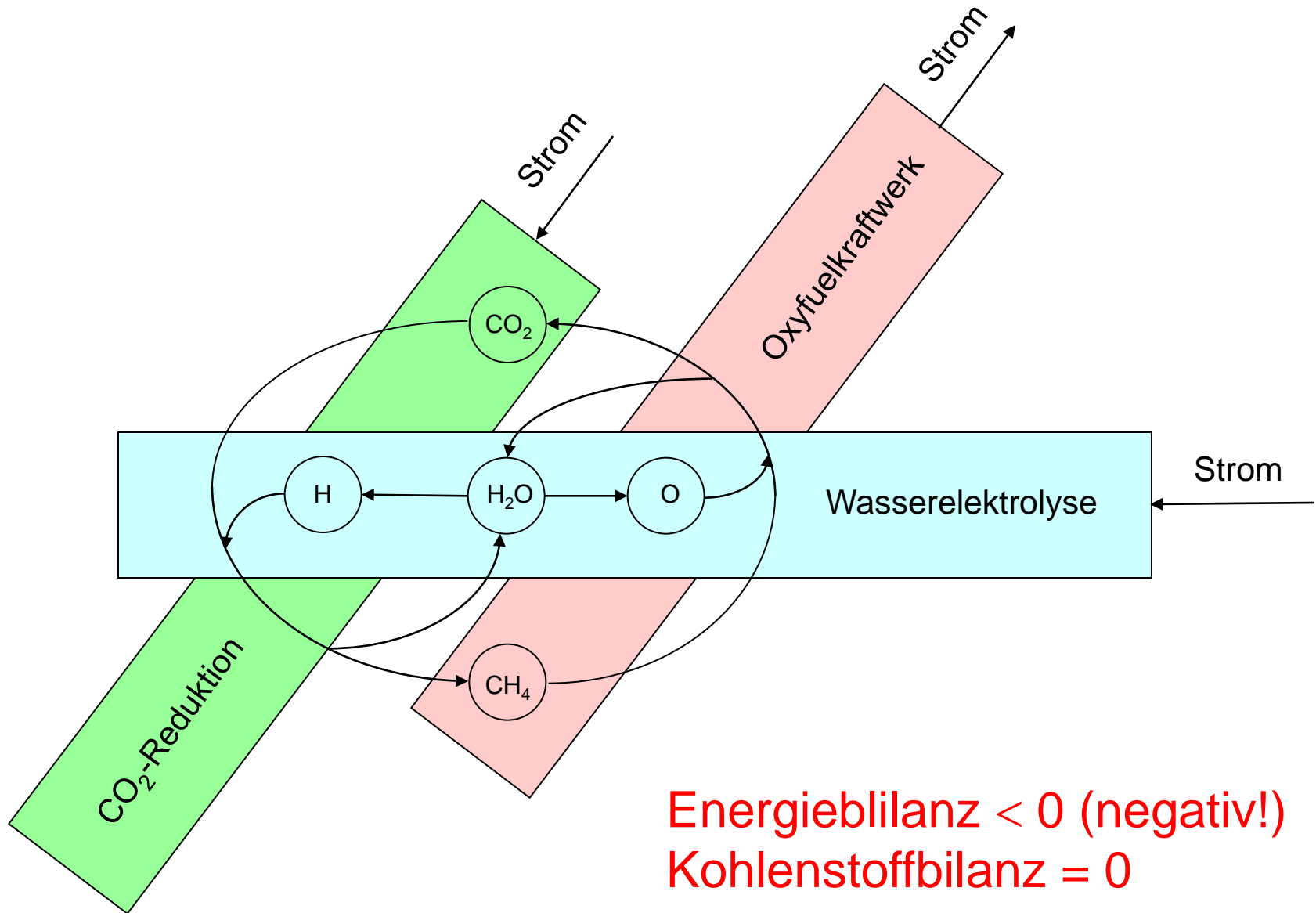
## Das gegenwärtige Kraftwerk



Energiebilanz > 0

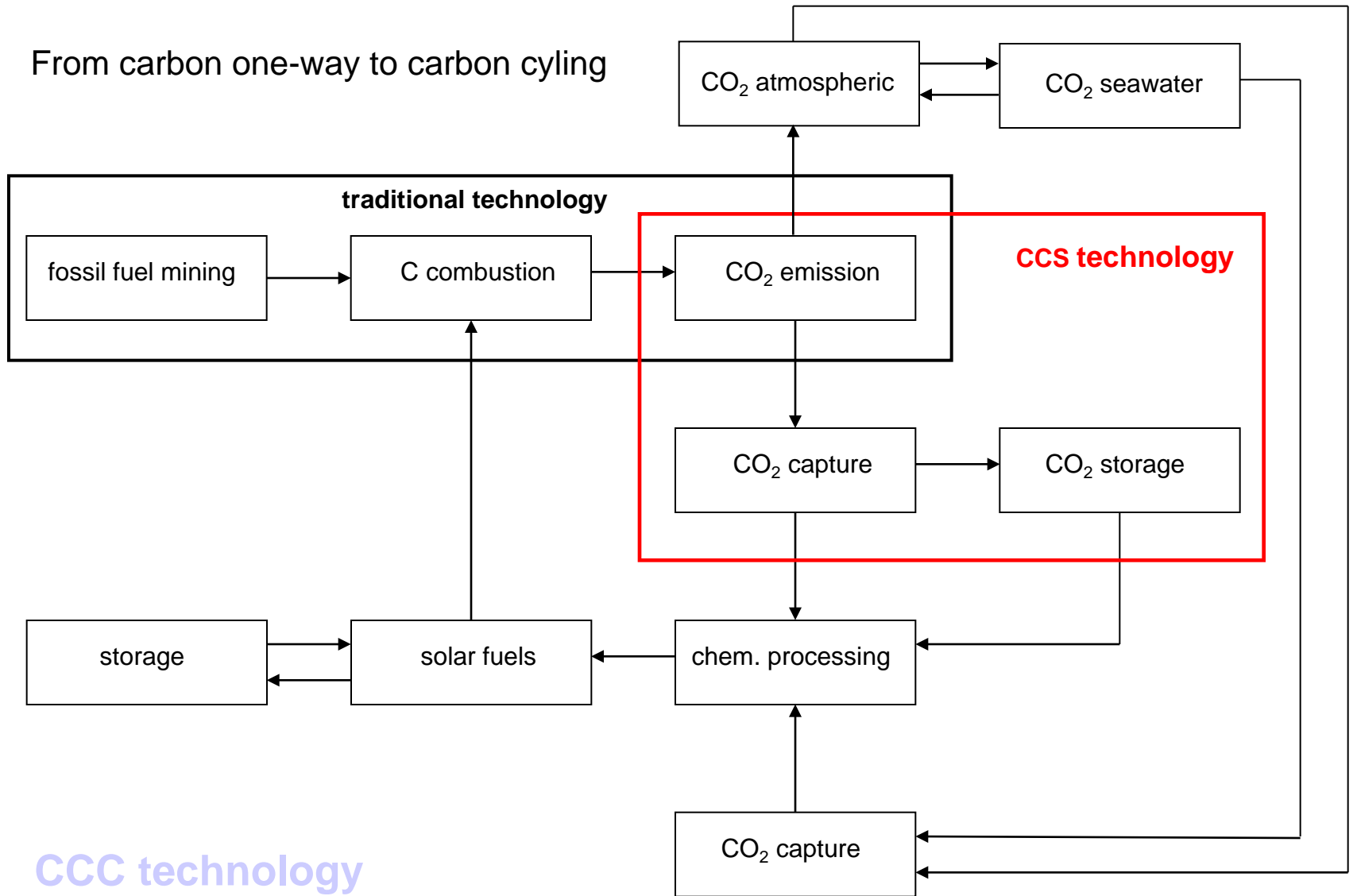
Kohlenstoffbilanz < 0 (negativ!)

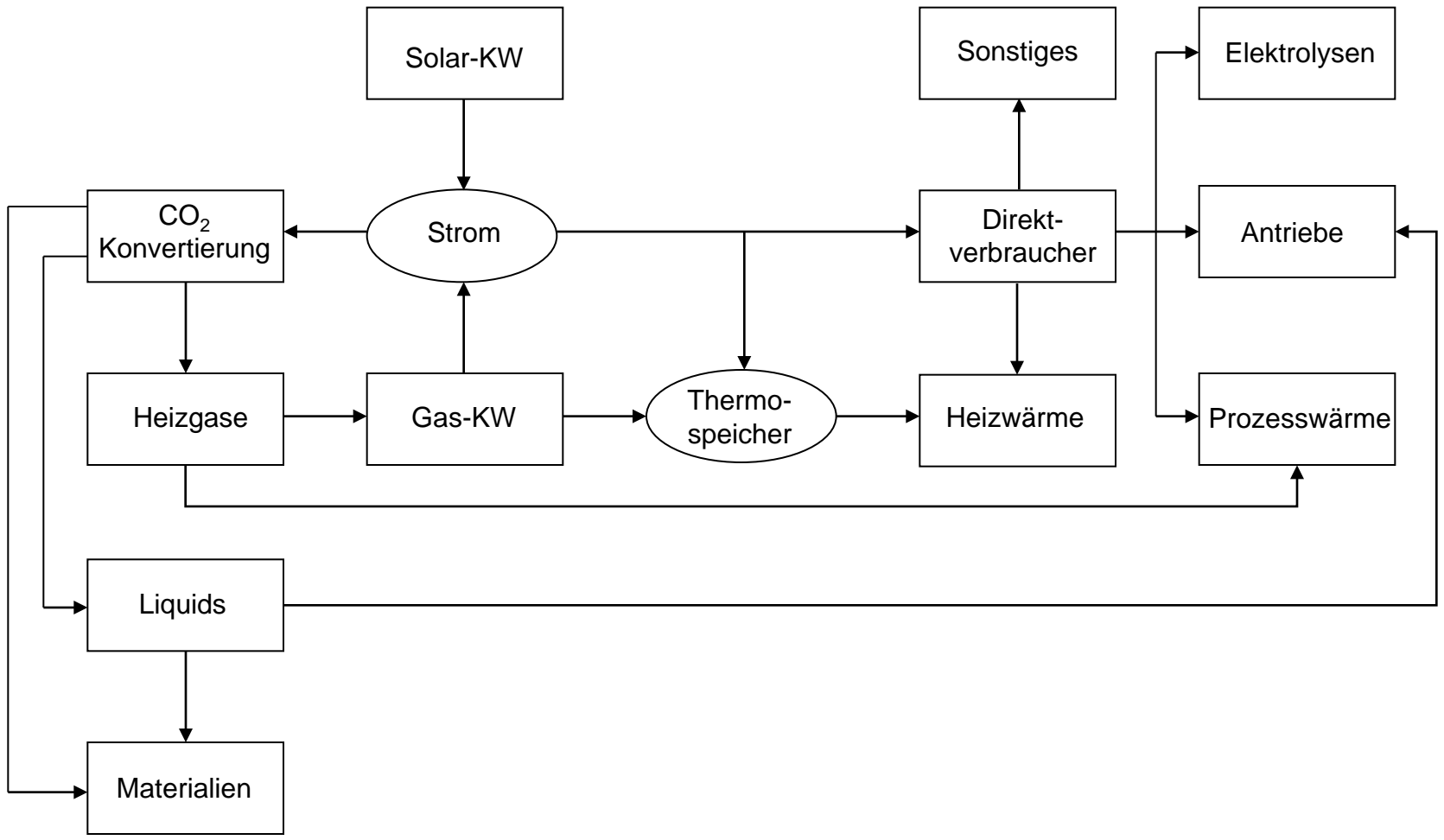
# Das Hybrid-Kraftwerk der Zukunft

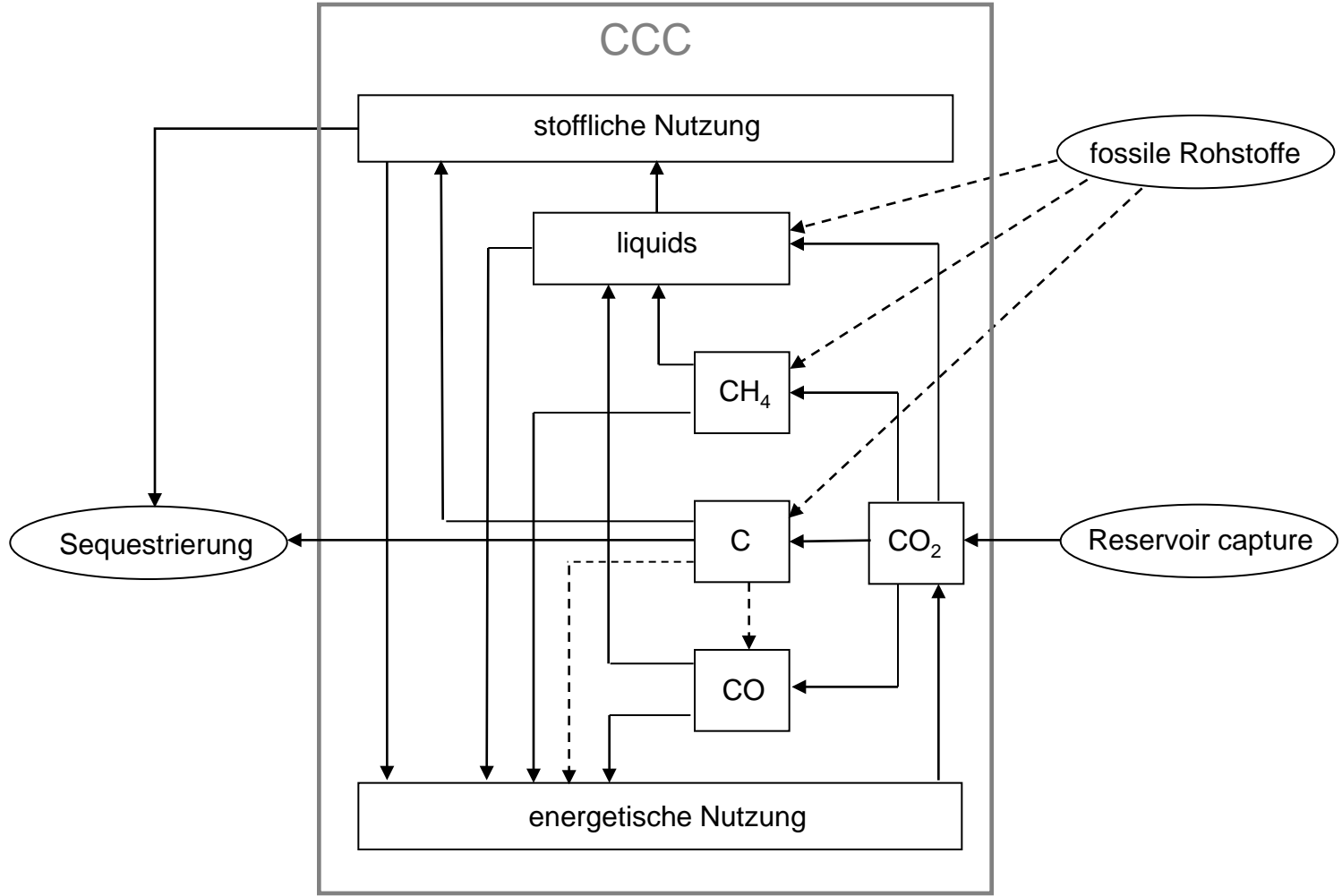


Energiebilanz < 0 (negativ!)  
Kohlenstoffbilanz = 0

# From carbon one-way to carbon cycling

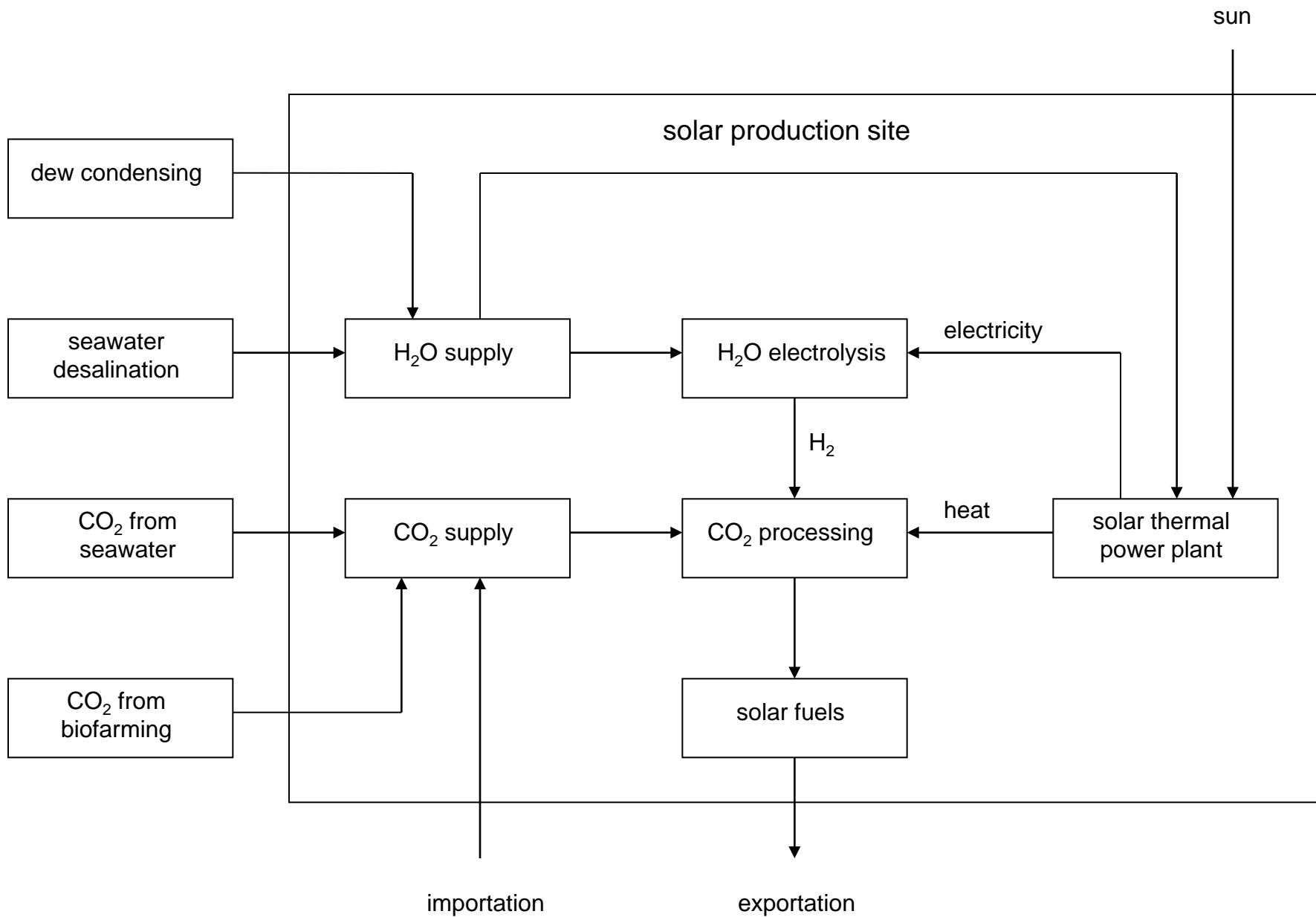






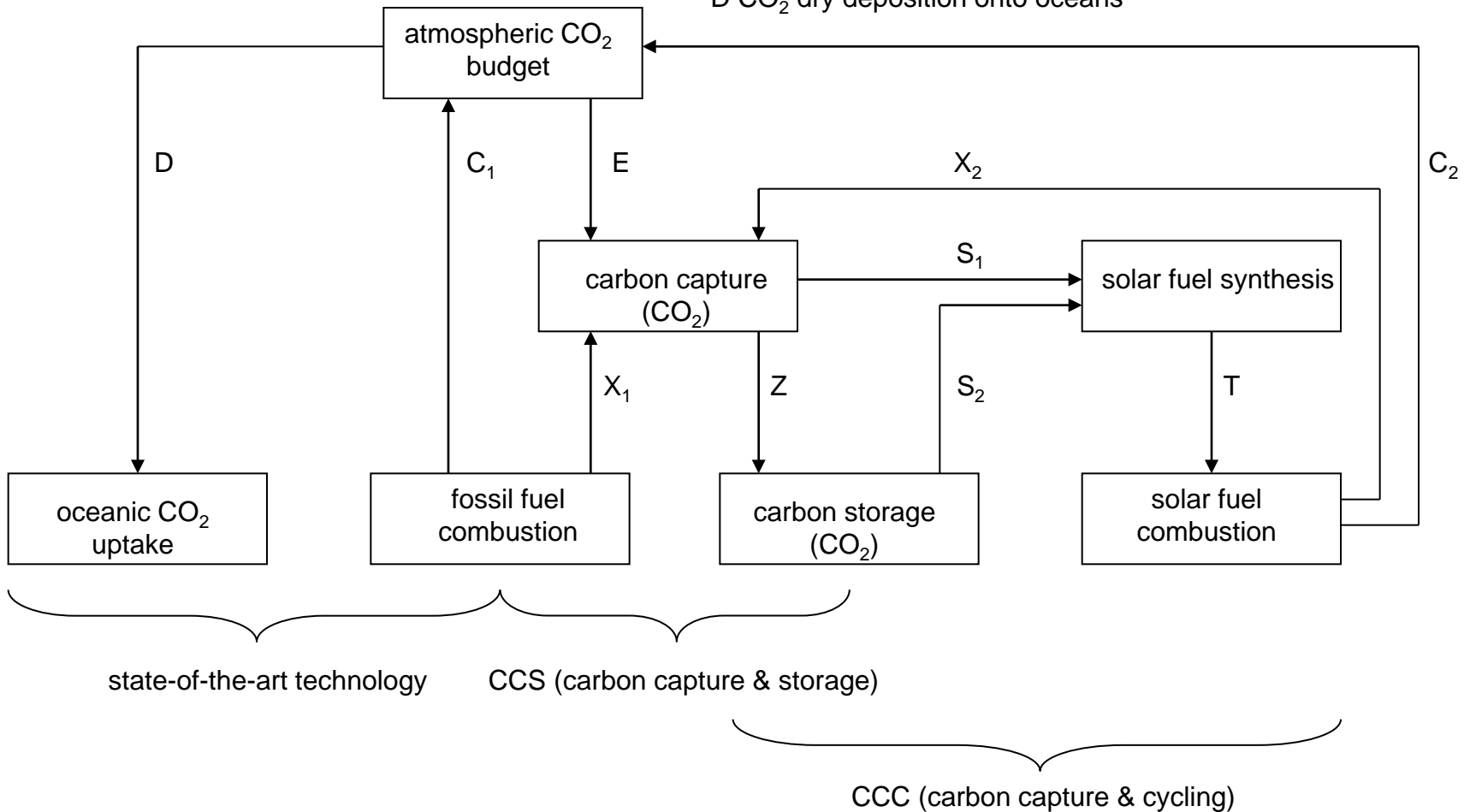
-----> traditionelle Technologie (Auslaufmodell)





# The human carbon cycle

- X capture of CO<sub>2</sub> from flue gases
- E extraction of CO<sub>2</sub> from air
- C fuel combustion without capture
- S solar-based synthesis of carbohydrates (methanisation)
- Z carbon storage
- T transport and distribution
- D CO<sub>2</sub> dry deposition onto oceans



# Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

**CCS** ist eine Brückentechnologie und die einzige Möglichkeit, den weiteren CO<sub>2</sub>-Anstieg zu bremsen, jedoch nicht wesentlich zu verringern.

Die wiss.-techn. Grundlagen von CCS werden jedoch zukünftig umgesetzt im **CCC-Konzept** (air capture und Hybrid-KW).

Einzig nachhaltige Zukunft der Energieversorgung ist Solarstrom (**Desertec-Konzept**).

Das zu lösende Problem ist die Speicherung des Solarstromes sowie die Bereitstellung stofflicher Energieträger für mobile und kleine Anlagen (**SONNE-Konzept**): Atmosphärisches CO<sub>2</sub> wird der Kohlenstoffrohstoff für Energiespeicherung und Materialwirtschaft. Durch Air Capture wird der C-Kreislauf geschlossen.

**Klimasaniierung** (langfristig) durch Rückführung atmosphärischen CO<sub>2</sub> in sequestrierten Kohlenstoff.



**Danke!**