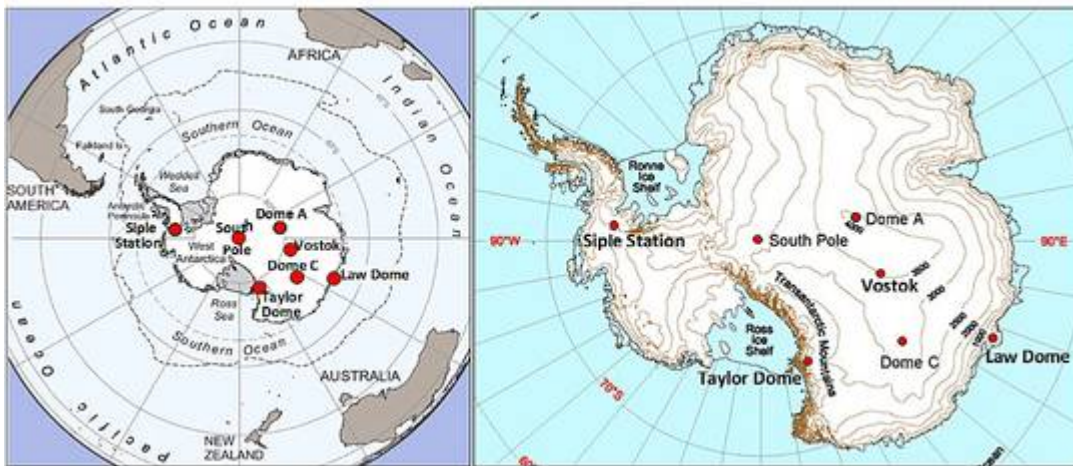


# Vostok und die 8000-Jahre-Verzögerung

Wie am Ende dieses Beitrags diskutiert, muss in Betracht gezogen werden, dass die geochemischen Zyklen von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> in Eis, Permafrost, terrestrischen und ozeanischen Biosphären sowie in der Tiefsee während glazialer Gefrier-/Auftauzyklen irgendwie in allgemeiner Weise mit der Temperatur korreliert sind. Diese Korrelation zeigt, dass CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> von der Temperatur kontrolliert werden, so dass es keinerlei Beweise dafür gibt, dass CO<sub>2</sub> oder CH<sub>4</sub> irgendwelche orbitalen Zyklen geschuldete Temperatursignale verstärken.

## Einführung



**Abbildung 1:** Geogr. Lage der Antarktis, von Vostok und anderen Orten, an denen Eisbohrkerne gezogen worden sind

Die russische Antarktisstation Vostok liegt 1300 km vom Südpol entfernt und ziemlich genau in der Mitte des antarktischen Kontinents in einer Höhe von 3488 m ü. NN. Gegenwärtig gibt es dort im Mittel 2,6 mm Niederschlag pro Jahr. Die mittlere Temperatur beträgt -55°C, der Kältereord liegt bei -89,2°C, also unter dem Gefrierpunkt von CO<sub>2</sub>. Vostok ist einer der lebensfeindlichsten Orte der Erde [und doch gibt es dort Leben! Anm. d. Übers.].

Es gibt eine ganze Historie des Erbohrens verschiedener Eisbohrkerne bei Vostok. Der wichtigste Bohrkern und Gegenstand dieses Beitrags wurde im Jahre 1995 erbohrt. Dieser Vostok-Eisbohrkern ist 3310 Meter lang und repräsentiert 422.766 Jahre Schneeakkumulation. Ein einzelnes Jahr wird demnach durch nur 7,8 mm Eis repräsentiert. Vostok ist eine sehr, sehr kalte Wüste, und die sehr langsame Eisakkumulation bringt signifikante Unsicherheiten in die Daten.

Neben den Eisbohrkernen ist Vostok berühmt für den unter dem Eis liegenden See, der als einer der größten Seen der Welt kartographiert worden ist, überdeckt er doch eine Fläche von 14.000 km<sup>2</sup>. Es ist eindeutig unter dem Eis sehr viel wärmer als an der Oberfläche.

**Abbildung 2 (oben rechts):** Landschaft bei Vostok

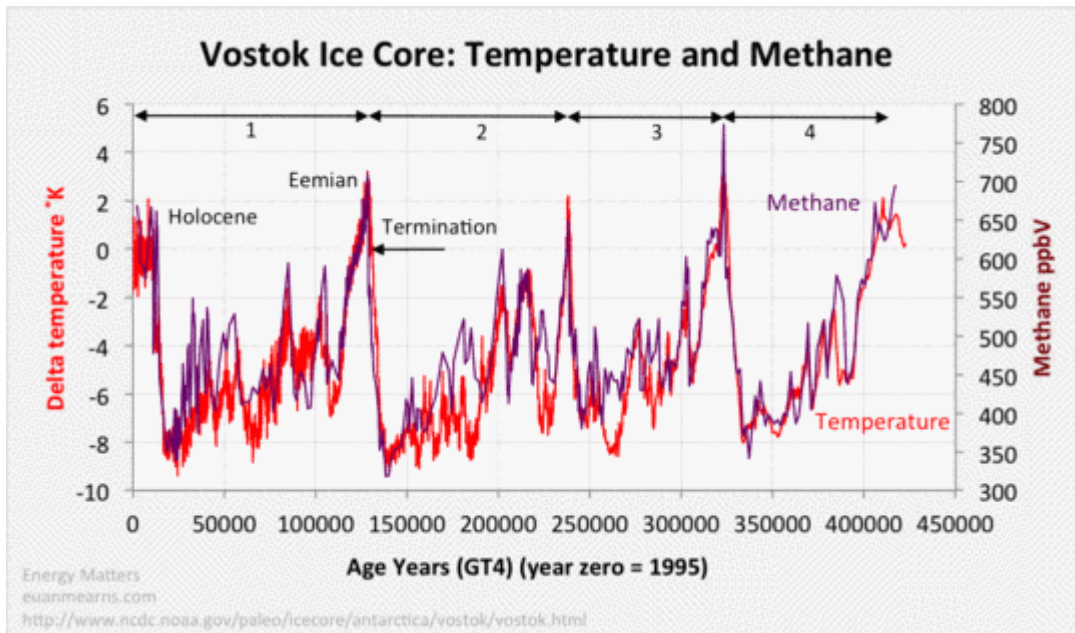
**Daten: Temperatur, CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>**

**Beim Vergleich der Signale dieser drei physikalischen Elemente im Vostok-Bohrkern ist es wichtig zu verstehen, dass das Temperatursignal durch Wasserstoff getragen wird: die Menge von Deuterium-Isotopen im Wasser, aus dem sich das Eis bildet. Die Signale bzgl. CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> kommen dagegen aus im Eis eingeschlossenen Luftbläschen. Diese im Eis eingeschlossenen Luftbläschen werden immer als jünger erachtet als das Eis um sie herum, was der Zeitverschiebung zwischen Schneefall und Eisbildung um das Luftbläschen herum geschuldet ist. In Vostok beträgt diese zeitliche Verzögerung zwischen Schneefall und Eisbildung um das Bläschen zwischen 2000 und 6500 Jahre. Daher wird eine substantielle Korrektur angebracht, um das Alter der Luftbläschen an das Alter des Eises anzugleichen, und die Genauigkeit dieses Vorgangs muss man**

**im Hinterkopf behalten bei Interpretationen. Die Vostok-Daten stehen [hier](#) zum Download bereit.**

**Man beachte, dass die Zeit in allen meinen Graphiken von rechts nach links läuft, wobei der „heutige Tag“ links liegt. Als der heutige Tag (Jahr Null) wird das Jahr 1995 erachtet, also das Jahr der Erbohrung dieser Kerne. Die GT4-Zeitskala von Petit et al. wird verwendet (1).**

**Die Methan-Konzentrationen in Luftbläschen und Temperaturvariationen in Vostok sind unglaublich gut gleichlaufend, vor allem am Ende und bei wiedereinsetzenden Vereisungen, wenn die Temperaturänderungen maximal sind (Abbildung 3).**

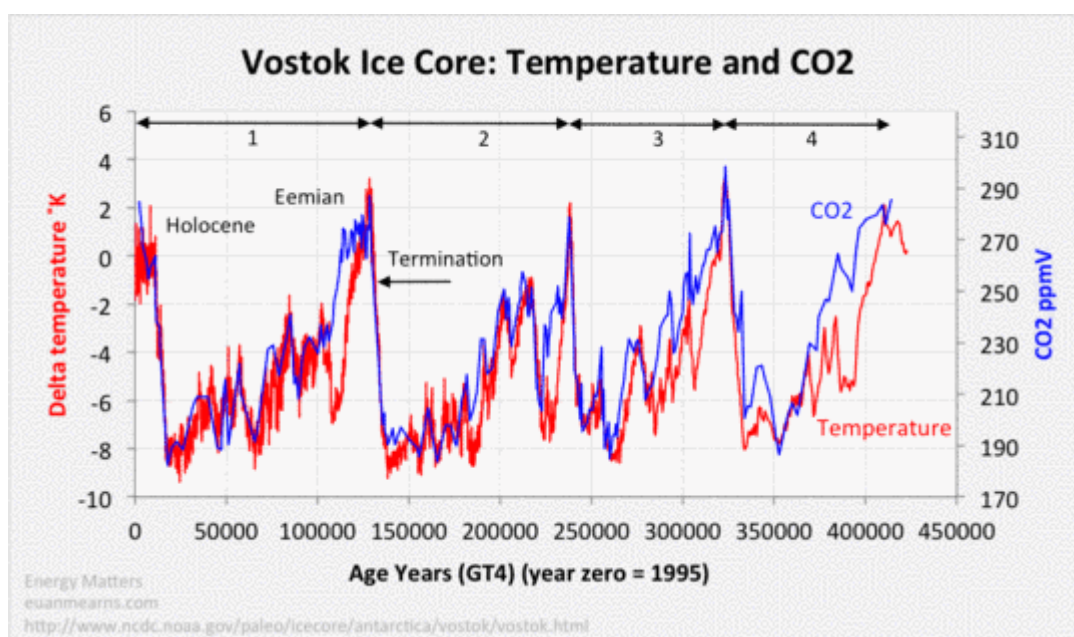


**Abbildung 3: Methan- und Temperaturvariationen. Man beachte, wie Methan und Temperatur besonders stark gleich laufen am Ende einer Eiszeit und während der nachfolgenden Rückkehr zu glazialen Bedingungen.**

**Dies zeigt, dass die Kalibrierung von Eiszeit und Gaszeit gut ist. Aber zeigt es auch, dass Methan-Variationen von  $\pm 200$  ppmd (parts per Milliarde) die orbitale Kontrolle von Vereisungen verstärken?**

**Das Passformat von CO<sub>2</sub> zur Temperatur ist tatsächlich nicht einmal annähernd so gut wie für CH<sub>4</sub>. Es gibt eine**

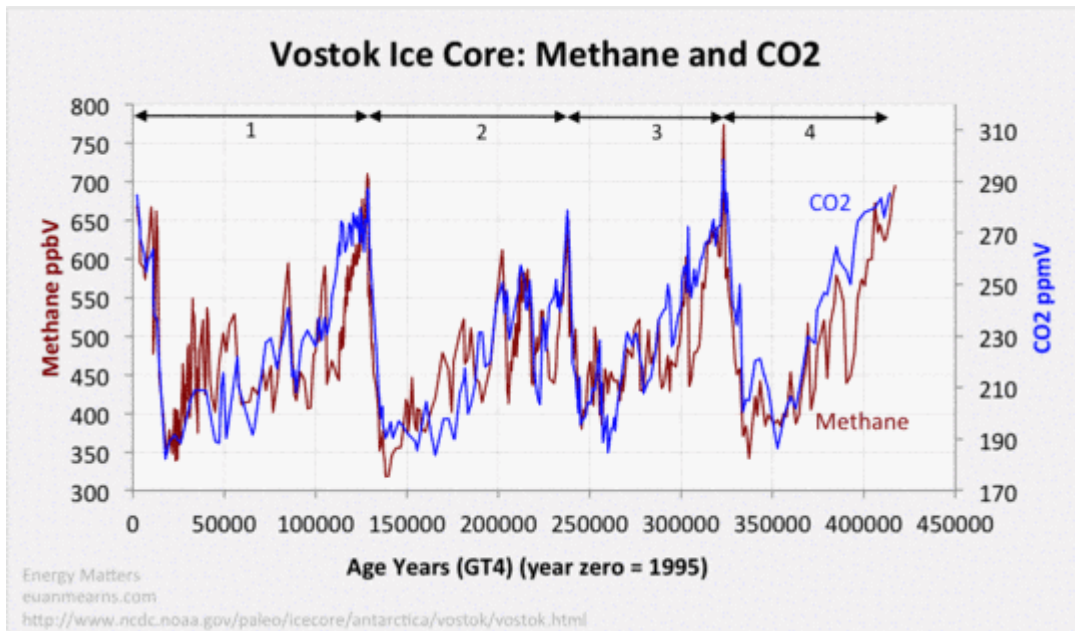
**persistente Tendenz, dass CO<sub>2</sub> der Temperatur hinterher hinkt, und dieser Zeitverzögerung ist am stärksten ausgeprägt am Beginn jedes glazialen Zyklus', wobei das CO<sub>2</sub> der Temperatur um viele tausend Jahre hinterher läuft (1) (Abbildung 4).**



**Abbildung 4: CO<sub>2</sub> und Temperatur scheinen im Großen und Ganzen gut korreliert, aber es gibt ein paar signifikante Abweichungen. Am Ende von Eiszeiten (Terminationen) ist das Alignment genauso gut wie für Methan. Aber während des Rückfalls in die nachfolgende Vereisung gibt es eine**

***Zeitverzögerung zwischen CO<sub>2</sub> und Temperatur von vielen tausend Jahren. Petit et al (1) haben dies bemerkt, aber keine Erklärung angeboten. Um jedoch der Bedeutung der Beobachtung Rechnung zu tragen ziehen sie es stattdessen vor, nicht haltbare Behauptungen aufzustellen darüber, dass CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> orbitale Antriebe verstärken.***

**Es ist daher keine Überraschung, dass CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> signifikante Unterschiede zeigen (Abbildung 5) hinsichtlich der Zeitverzögerung von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> ähnlich der Zeitverzögerung zwischen CO<sub>2</sub> und Temperatur.**



***Abbildung 5: CO<sub>2</sub> läuft Methan zeitlich hinterher ähnlich der Art und Weise, wie es der Temperatur hinterherläuft. Diese Zeitverzögerung ruft nach einer Erklärung, deren Wurzeln in einer geochemischen Umgebung zu suchen sind, in der beide Gase emittiert und abgeschieden werden. Petit et al (1) räumen der Erklärung der physikalischen Prozesse hinter CO<sub>2</sub>- und Methan-Variationen erstaunlich wenig Raum ein.***

**Tatsächlich scheinen Petit et al (1) mehr darauf bedacht gewesen zu sein, die Ähnlichkeiten zu betonen als die**



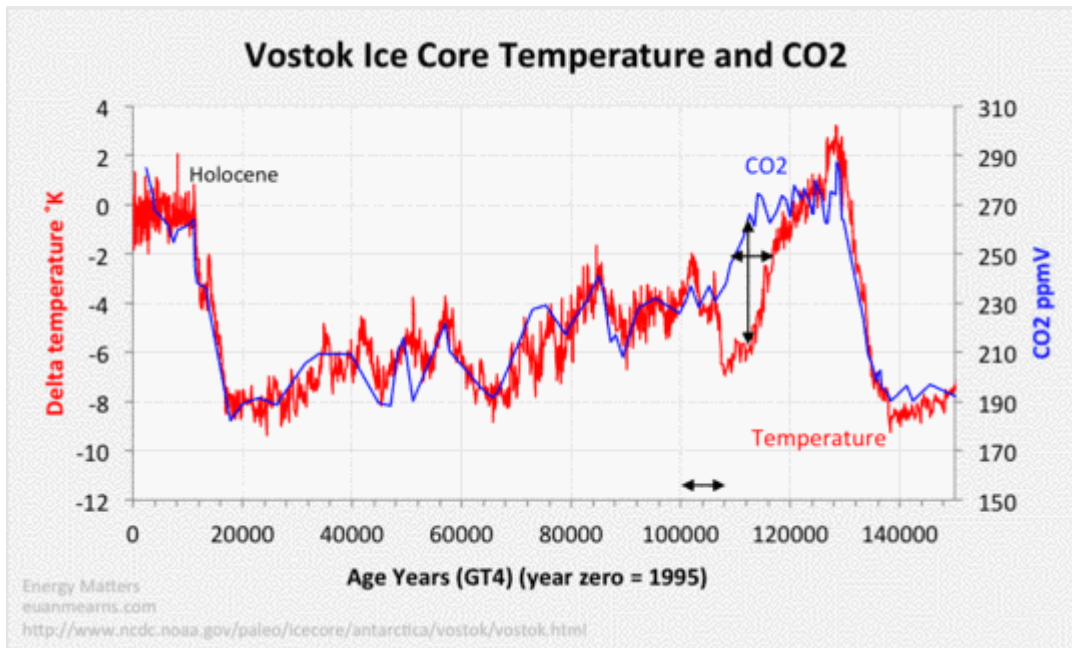
**bedeutenden Unterschiede darzustellen...**

***Die Gesamt-Korrelation zwischen unseren CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Aufzeichnungen und der isotopischen Temperatur der Antarktis ist bemerkenswert ( $r^2 = 0.71$  und  $0.73$  jeweils für CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>). Diese hohe Korrelation zeigt, dass CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> zu glazialen/zwischen-glazialen Änderungen während des gesamten Zeitraumes beigetragen haben können durch Verstärkung des orbitalen Antriebs zusammen mit Albedo und möglicherweise anderen Änderungen.***

**Tatsächlich wird die hohe Korrelation am besten dadurch erklärt, dass sowohl CO<sub>2</sub> als auch CH<sub>4</sub> auf Temperaturänderungen reagieren und diese „nicht verursachen“. Und aus diesen Daten gehen Null Beweise hervor, dass eine Verstärkung durch den orbitalen Antrieb stattgefunden hat, was jedoch nicht heißt, dass das nicht doch der Fall war.**



Abbildung 6 zeigt eine erweiterte Sicht der letzten Vereisung, in der man ziemlich klar erkennen kann, dass es eine Zeitverzögerung von etwa 8000 Jahren zwischen fallender Temperatur und CO<sub>2</sub>-Rückgang gibt. Die Temperatur fiel auf Eiszeitbedingungen (-6°C) mit zwischeneiszeitlichen CO<sub>2</sub>-Werten von 265 ppmV. Methan fiel sofort mit der Temperatur, CO<sub>2</sub> aber nicht. Dies zeigt, dass das CO<sub>2</sub> kaum Kontrolle ausübt auf die wesentliche Struktur des glazialen Zyklus', der durch orbitale Antriebe kontrolliert wird. Ähnliche Zeitverzögerungen gibt es zu Beginn jedes einzelnen glazialen Zyklus' (Abbildung 4). Dies ist eindeutig ein wichtiger und reproduzierbarer geologischer Prozess oder eine Abfolge von Prozessen.



**Abbildung 6: Details der letzten 150.000 Jahre zeigen, wie CO2 der Temperatur um etwa 8000 Jahre hinterher läuft nach der Eemian-Zwischeneiszeit. Volle Eiszeitbedingungen etablierten sich bei zwischeneiszeitlichen CO2-Konzentrationen.**

## **Diskussion**

**Die Zyklizität von**

**CO<sub>2</sub> und Methan muss  
in Termen von  
Flüssen, Quellen  
und Senken  
interpretiert  
werden. Steigt die  
Konzentration,  
zeigt dies, dass  
die Erzeugungsrates  
höher ist als die  
Rate des Ausfallens  
und umgekehrt.**

**Betrachtet man  
glaziale Zyklen,  
gibt es eine  
Vielzahl von  
Prozessen, von  
denen man sich  
vorstellen kann,  
dass sie die Flüsse  
sowohl von CO<sub>2</sub> als  
auch von CH<sub>4</sub>  
beeinflussen.  
Beispiele hierfür**

**sind Steigen und  
Fallen des  
Meeresspiegels,  
Drainage von Land,  
Wachstum und  
Verfall von  
Vegetation,  
Bodenveränderungen,  
Eisschilde und  
Schmelzen des  
Permafrostbodens,  
Änderungen der**

**Bioproduktivität in  
den Ozeanen,  
Änderungen der  
Ozean-Zirkulation  
und hier im  
besonderen  
thermohaline  
Zirkulation.**

**CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> steigen  
gemeinsam mit der  
Temperatur am Ende  
der Eiszeiten, und**

**man ist in  
Versuchung zu  
erklären, dass die  
Quelle dieser  
beiden Gase die  
gleiche ist. Dies  
ist wahrscheinlich  
nur teilweise  
richtig. Die  
bekannteste Quelle  
für CH<sub>4</sub> ist  
wahrscheinlich der**



**auftauende  
Dauerfrostboden  
unter und neben den  
schmelzenden  
Eisschilden der  
Nordhemisphäre.  
Dabei wird auch  
etwas CO<sub>2</sub>  
freigesetzt. Das  
Eis selbst enthält  
ebenfalls kleine  
Mengen beider Gase.**

**Als die  
wahrscheinlichste  
Quelle für CO<sub>2</sub>  
werden die Ozeane  
betrachtet, wo sich  
erwärmendes  
Meerwasser weniger  
CO<sub>2</sub> halten kann. So  
ist der  
gleichlaufende  
Anstieg von CH<sub>4</sub> und  
CO<sub>2</sub> mit der**

**Temperatur  
geradlinig zu  
erklären in Zeiten  
rapider Erwärmung  
und schmelzender  
Eisschilde. Stoppt  
die Erwärmung,  
stoppt auch der  
Anstieg von CH<sub>4</sub> und  
CO<sub>2</sub>, aber gerade  
dann, wenn die  
Treibhausgase**

**maximal enthalten  
sind, wird es  
wieder kälter. Dies  
allein zeigt, dass  
Treibhausgase nur  
eine untergeordnete  
Rolle bei der  
Modulation  
glazialer  
Temperaturen und  
Klimate spielt.**

**Warum also nehmen**

**CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> während  
Abkühlung in der  
Folge nicht  
ebenfalls  
gleichlaufend ab?  
Es gibt keine echte  
Senke für CH<sub>4</sub>.  
Stattdessen wird es  
in der Atmosphäre  
weitgehend zerlegt  
durch eine Reaktion  
mit Sonnenlicht und**

**Sauerstoff, woraus  
sich dann CO<sub>2</sub>  
bildet. Die  
Verweildauer ist  
ziemlich kurz, etwa  
10 Jahre. Der den  
Beginn einer  
Zwischeneiszeit  
markierenden  
rapiden Erwärmung  
folgt normalerweise  
kurz darauf eine**

**rapide Abkühlung.  
Man kann sich  
vorstellen, dass  
der Permafrostboden  
allmählich wieder  
gefriert, was zu  
einer Reduktion des  
Methanflusses  
führt. Die Rate der  
Zerlegung  
übersteigt die Rate  
der Freisetzung,**



**und die  
Konzentration nimmt  
ab.**

**Die große  
Zeitverzögerung für  
CO<sub>2</sub> ist nicht so  
einfach zu  
erklären. Am Ende  
einer Eiszeit sowie  
während der Phase  
der Erwärmung muss  
man von sich**

**polwärts  
ausbreitenden und  
verstärkt  
wachsenden Wäldern  
ausgehen. Ich kann  
nur vermuten, dass  
die Masse der  
terrestrischen  
Biomasse zunimmt.  
Ich weiß nicht, was  
mit der Masse der  
ozeanischen**

**Biosphäre passiert,  
die in kaltem  
Wasser oftmals  
produktiver ist.  
Ich kann auch  
spekulieren, dass  
die thermohaline  
Zirkulation  
gefestigt oder  
verstärkt wird, was  
ein teilweises  
Ausgasen der**

**kohlenstoffreichen  
Tiefsee ermöglicht.  
Es ist schwierig,  
diese  
Puzzlesteinchen in  
quantitativer Weise  
zusammenzuführen,  
aber es reicht aus  
um zu sagen, dass  
die Erwärmung einer  
Zunahme des  
atmosphärischen**

**C02-Gehaltes  
vorausgeht. Warum  
also geht der C02-  
Gehalt bei  
Abkühlung nicht  
ebenfalls sofort  
zurück?**

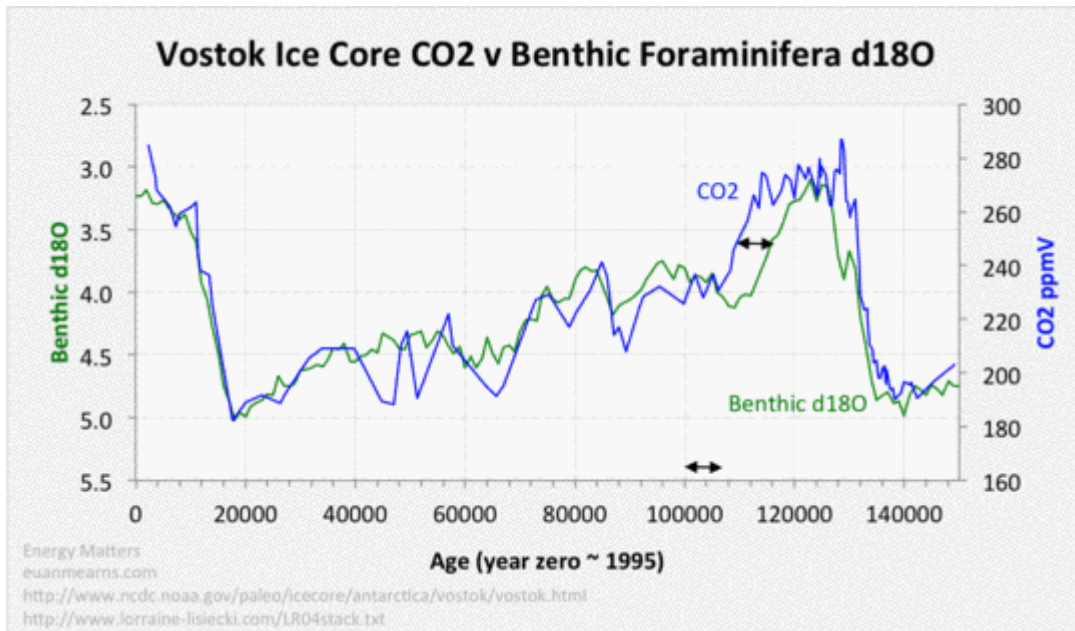
**Ein  
offensichtlicher  
Gedanke lautet,  
dass dies verbunden  
ist mit der**

**thermischen  
Trägheit der  
Ozeane. Dass sich  
Festland und  
Atmosphäre  
abgekühlt haben und  
die Ozeane erst mit  
einer  
Zeitverzögerung von  
einigen tausend  
Jahren dieser  
Abkühlung folgen.**

**Ein einfacher Weg,  
dies zu untersuchen  
war es, den Vostok-  
Eisbohrkern mit den  
Aufzeichnungen der  
Ozean-Temperaturen  
zu vergleichen, wie  
es aus den  $\delta^{18}O$ -  
Signaturen der  
global verteilten  
benthischen  
Foraminiferen (3),**



**(Abbildung 7)  
hervorgeht. Es gibt  
eine ähnliche  
Zeitverzögerung in  
den Ozeanen  
zwischen Temperatur  
(d180) und CO2  
(Abbildung 7). Der  
Gedanke der  
thermischen  
Trägheit ist also  
falsch.**



***Abbildung 7: Es gibt eine ähnliche Zeitverzögerung zwischen CO2 aus dem Vostok-Bohrkern und der Temperaturaufzeichn***

***ung benthischer  
Foraminiferen im  
Nordatlantik (3).  
Sie zeigt, dass der  
langsame Rückgang  
des CO<sub>2</sub>-Gehaltes  
nichts mit der  
thermischen  
Trägheit der Ozeane  
zu tun hat.***

**Was also könnte da  
vor sich gehen? Vor**

**einigen Monaten  
haben Roger und ich  
eine Reihe von  
Beiträgen zum  
Kohlenstoffkreislauf  
der Erde  
gepostet. Wir sind  
niemals wirklich  
bis auf den Grund  
hiervon  
vorgestoßen, aber  
während des**

**Prozesses haben wir  
viel gelernt und  
viele interessante  
Daten entdeckt. Ich  
ziehe drei  
vorläufige  
Schlussfolgerungen:  
1) ozeanisches  
Tiefenwasser  
enthält viel mehr  
Kohlenstoff als das  
Wasser an der**

**Oberfläche, und  
weil das so ist,  
kann 2) die viel  
gepriesene  
ozeanische  
Löslichkeit von CO<sub>2</sub>  
als Pumpe nicht  
existieren, und 3)  
der größte CO<sub>2</sub>-  
Anteil wird aus der  
Atmosphäre durch  
Photosynthese**

**entfernt – Bäume  
auf dem Festland  
und Phytoplankton  
in den Ozeanen (4).  
Dies könnte uns  
helfen, die CO<sub>2</sub>-  
Zeitverzögerung zu  
verstehen. Das  
ozeanische  
Tiefenwasser  
enthält riesige  
Mengen Kohlenstoff,**

**erzeugt durch in  
der Tiefe  
verrottendes  
Plankton, und wenn  
sich die Ozeane  
erwärmen oder sie  
umgewälzt werden,  
kann dieser  
Kohlenstoff rasch  
in die Atmosphäre  
ausgasen. Aber der  
umgekehrte Weg ist**



**nicht so einfach,  
da er von der Rate  
der Photosynthese  
abhängt. Kurz  
gesagt, es scheint,  
dass die Ozeane CO<sub>2</sub>  
viel leichter  
ausatmen als wieder  
einatmen können.**

**Auf dem Festland  
wird das  
Wiederaanwachsen von**

**nordhemisphärischen  
Eisschilden die  
Wälder in hohen  
Breiten zerstören  
und zu einer  
globalen Migration  
der Klimagürtel in  
Richtung Äquator  
führen. Absterbende  
Wälder reduzieren  
die Größe der  
terrestrischen CO<sub>2</sub>-**

**Pumpe, während sich gleichzeitig eine neue CO<sub>2</sub>-Quelle auftut: verrottendes Pflanzengut. Dies wird dazu tendieren, die Fähigkeit der ozeanischen Biosphäre zu reduzieren, während**

**der Abkühlungsphase  
CO<sub>2</sub>  
herauszufiltern.**

**Schlussfo  
lgerungen**

**● Vier**

**glaziale**

**Zyklen**

**lang**

**zeigen**

**CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>**

**und**

**Temperatu  
r eine  
zyklische  
Ko-  
Variation  
. Dies**

wurde von  
der  
klimawiss  
enschaftl  
ichen  
Gemeinsch

**aft als  
Beweis  
für die  
Verstärku  
ng  
orbitaler**



**Antriebe**

**via**

**Treibhaus**

**gas -**

**Rückkoppl**

**ungen**

# angeführt

- 

- Ich bin  
nicht der  
Erste,

**der  
beobachte  
t, dass  
der CO<sub>2</sub>-  
Verlauf  
im**

**Vostok-  
Eisbohrer  
rn (2)  
der  
Temperatu  
r**

**hinterher  
läuft,  
und  
tatsächlich  
kommen  
Petit et**

**al. (1)**

**zu der**

**Beobachtung,**

**dass**

**bei**

**Beginn**

**einer**

**Eiszeit**

**die**

**„Änderung**

**des CO<sub>2</sub>-**

**Anteils**

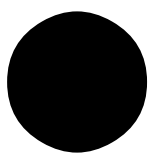
**um viele  
tausend  
Jahre  
hinterher  
läuft.  
Aber sie**



**diskutier  
en dies  
nicht,  
ebensowen  
ig wie  
die**

**ziemlich  
ausgepräg  
ten  
Implikati  
onen  
dieses**

# Tatbestand des .



Temperatu  
r und CH4

**sind**

**extrem**

**eng**

**korrelier**

**t ohne**

**jede**

**Zeitverzö  
gerung.**

**Während  
also CO<sub>2</sub>  
und CH<sub>4</sub>  
in**

**allgemein  
er Weise  
mit der  
Temperatu  
r  
korrelier**

**t sind,  
zeigen  
sie in  
ihrer  
Reaktion  
auf**

**globale**

**geochemis**

**che**

**Zyklen**

**ein**

**unterschi**



**edliches  
Verhalten**

**. Auch**

**dies**

**merken**

**Petit et**

**al (1)**

**an, ohne**

**den**

**Versuch**

**einer**

**Erklärung**

**zu**

**Liefern.**

● **Zu**

**Beginn**

**der**

**letzten**

**Eiszeit**

**betrug**

**die**

**Zeitverzö**

**gerung**

**8000**

**Jahre,**

**und die**

**Welt fiel**

**in die**

**Tiefen**

**einer  
Eiszeit,  
wobei die  
CO<sub>2</sub>-  
Varianz  
nachgewie**

**senermaße**

**n nur**

**wenig zum**

**großen**

**Temperatu**

**rrückgang**

# beitragen

- 

- Die

einzig

mögliche



**Schlussfo  
lgerung  
aus dem  
Vostok-  
Bohrkern  
lautet,**

**dass  
Variation  
en von  
CO<sub>2</sub> und  
CH<sub>4</sub> beide  
durch**

**globale  
Temperatu  
ränderung  
en  
ausgelöst  
werden**

**sowie**

**durch**

**Zyklen**

**von**

**Gefrieren**

**und**

**Auftauen**

**in hohen**

**Breiten.**

**Diese**

**natürlich**

**en**

**geochemis  
chen**

**Zyklen**

**machen es**

**unvermeid**

**lich,**

**dass CH<sub>4</sub>  
und CO<sub>2</sub>  
mit der  
Temperatu  
r  
korrelier**

**en**

**werden .**

**Es ist**

**daher**

**grundfals**

**ch, diese**



**Beziehung  
en als  
Beweis  
für einen  
Klimaantr  
ieb durch**

**CO2**

**anzuführen**

**n, vor**

**allem**

**beim**

**Beginn**

**von  
Eiszeiten  
– es gibt  
hier  
keinerlei  
Korrelati**

**on .**

**[1] J. R.**

**Petit\* ,**

**J.**

**Jouzelet ,**

**D.**

**Raynaud\* ,**

**N. I.**

**Barkov‡ ,**

**J. -M.**

**BarnoŁa\* ,**

**I.**

**Basile\***,

**M.**

**Benders**,

**J.**

**Chappella**

**z\* , M.**

**Davisk ,**

**G.**

**DeLayguet**

**, M.**

**DeLmotte\***

**, V. M.**

**Kotlyakov**

**И, М.**

**Legrand\* ,**

**V. Y.**

**Lipenkov‡**



**, C.**

**Lorius\***,

**L. Pe**

**pin\***, **C.**

**Ritz\***, **E.**

**Saltzmann**

**& M.  
Stievenar  
dt (1999)  
Climate  
and  
atmospher**

**ic  
history  
of the  
past  
420,000  
years**

**from the  
Vostok  
ice core,  
Antarctic  
a. NATURE  
| VOL 399**

| 3 JUNE  
1999 |

[2] Jo

Nova: The

800 year

Lag –  
graphed

[3]

**Lisiecki  
& Raymo**

**(2005) A  
Pliocene-  
Pleistocene  
stack  
of 57  
globally**

**distribut  
ed**

**benthic**

**D180**

**records .**

**PALEOCEAN**



**OGRAPHY ,  
VOL. 20 ,  
PA1003 ,  
doi: 10.10  
29/2004PA  
001071**

[4]

Energy

Matters :

The

Carbon

Cycle: a

geologist  
's view

**Link:**

<http://wattsupwith>

that.com/

2014/12/2

7/vostok-

and-

the-8000-

year-

time-lag/

Übersetzt

von Chris

Frey EIKE