

Dendrokorrektur und CO₂-Problem: Ein Beitrag zur ¹⁴C-Datierungsmethode

Detlef Hebert

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Angewandte Physik, Bernhard-von-Cotta-Str.4, 09599 Freiberg

E-Mail: hebert@tu-freiberg.de

¹⁴C-Alter unterhalb von 10.000 Jahren können durch Anwendung von Dendrokorrekturkurven hinreichend genau in kalendarische Alter umgewandelt werden. Im Bereich höherer Alter zeigt sich eine zunehmend systematische Abweichung, die bei hohen ¹⁴C-Altern etwa 3.000 Jahre betragen kann.

Ursache, sowie Zusammenhänge zwischen dem CO₂-Problem der Klimaforschung und Altersfehlern der ¹⁴C-Methode werden erörtert.

1 Einführung in die ¹⁴C-Methode

Die Radiokohlenstoff-Datierungsmethode wurde vor etwa 50 Jahren von LIBBY, ANDERSON, ARNOLD u.a. ausgearbeitet (BERGER & MARSHALL-LIBBY 1980).

W.F.Libby (Nobelpreis 1960) erkannte, dass das in der unteren Atmosphäre über die Reaktion ¹⁴N(n, p) ¹⁴C natürlich produzierte ¹⁴C die mit dem CO₂ der Atmosphäre austauschenden Kohlenstoff-reservoirs (Biosphäre, Hydrosphäre) radioaktiv markieren sollte und dass der ¹⁴C-Gehalt organischer Materie infolge der radioaktiven Umwandlung von ¹⁴C (T_{1/2} = 5730 a) altersabhängig sein muss:

$$a(\tau) = a_0 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \tau\right) \quad (1)$$

Die wesentlichen Voraussetzungen für die Gültigkeit von Gleichung 1, nämlich:

- konstante Größe der globalen Kohlenstoffreservoirs,
- zeitlich stabile Austauschverhältnisse zwischen diesen Reservoirs und
- zeitlich konstante ¹⁴C-Produktion,

wurden damals als erfüllt angesehen.

DE VRIES stellte Ende der 50er Jahre fest, dass der ¹⁴C-Gehalt des atmosphärischen CO₂ in der

Vergangenheit Schwankungen unterlegen hatte (DE VRIES 1958), die zu Abweichungen der ¹⁴C-Alter vom kalendarischen Alter um einige Jahrhunderte führten. Als deren Ursache erkannte man später Schwankungen des magnetischen Dipolmomentes der Erde (BUCHA 1970), sowie periodische Änderungen der Sonnenaktivität (SONETT 1992).

Diese Unsicherheit der Radiokohlenstoff-Methode wurde für Alter bis zu 11.000 Jahren durch den Vergleich von ¹⁴C-Altern mit dendrochronologisch bestimmten Altern (Dendro-

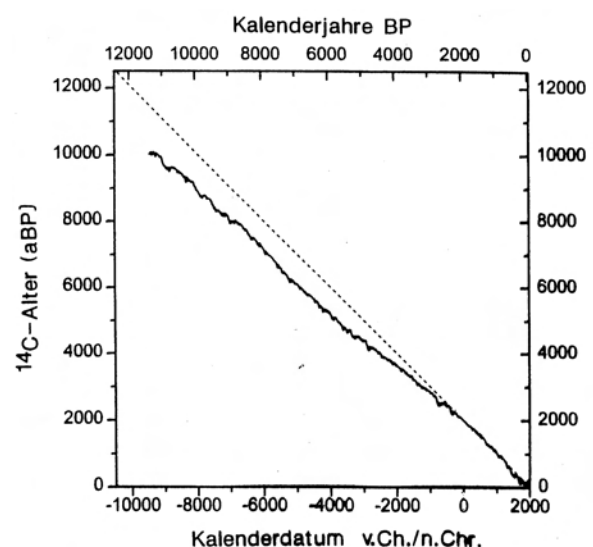


Abb. 1: Dendrokorrekturkurve (nach STUIVER 1982; PEARSON 1983; BECKER 1993).

korrekturkurve, Abb. 1) prinzipiell behoben (STUIVER 1982; PEARSON 1986; BECKER 1993).

Für den Altersbereich zwischen 12.000 und 44.000 Jahren sind, abgeleitet aus dem Vergleich von ^{14}C -Altern mit Uran-Thorium-Altern, Kalibrierkurven publiziert worden (BARD et al. 1990; BECK et al. 2001), die starke Abweichung der ^{14}C -Alter vom kalendarischen Alter (ca. –5.000 Jahre) belegen. Als Ursache werden neben Magnetfeldschwankungen und Variationen der Sonnenaktivität „starke Veränderungen im globalen CO_2 -Kreislauf“ vermutet.

2 Das CO_2 -Problem

Ein signifikantes Ereignis im CO_2 -Austauschsystem ist aus der Klimaphysik bekannt: Es handelt sich um den raschen Anstieg des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre am Eiszeitende, also zwischen 20.000 und 10.000 B.P.

Das haben CO_2 -Bestimmungen an Luft aus Eisbohrkernen der Station Camp Century (Grönland) und Byrd (Antarktika) ergeben (DANSGAARD et al. 1971; JOHNSEN et al. 1972). Unter dessen ist die Variation des CO_2 -Gehaltes der Luft zwischen 190 ppm im Hochglazial (zuletzt ca. 20.000 B.P.) und 280 ppm in der Warmzeit für vier Eiszeit-Warmzeit-Perioden (Abb.2).

Die deutliche Abnahme des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre im Verlauf der Eiszeit hatte Anlass zu weitreichenden Befürchtungen hinsichtlich einer globalen Erwärmung infolge der anthropogenen CO_2 -Freisetzung in jüngster Zeit gegeben

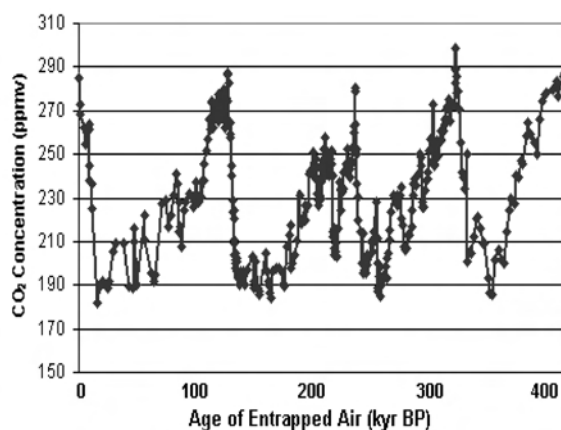


Abb. 2: CO_2 -Gehalt in Luft eines Eisbohrkerns der Antarktisstation Vostok (BARNOLA et al. 2003).

(z.B. MANABE & WETHERALD 1975; FLOHN 1984; WIGLEY 1987; GRIESER, STAEGE & SCHÖNWIESE 2000). Ursache für die Einordnung des Kohlendioxides in die Gruppe der gefährlichsten Treibhausgase war einerseits eine zweifelhafte Extrapolation aus Untersuchungen zum natürlichen Treibhauseffekt (KONDRATYEV 1969) und andererseits der zunächst nicht bekannte Kausalzusammenhang zwischen CO_2 -Absenkung in der Atmosphäre und globaler Temperaturabnahme bzw. der möglichen Umkehr beider Vorgänge.

Unter dessen gilt als erwiesen, dass die CO_2 -Abnahme in atmosphärischer Luft der globalen Abkühlung innerhalb der Eiszeit folgte (Abb. 3).

Insbesondere ist aus Abb. 2 und Abb. 3 zu ersehen, dass das Klimasystem der Erde den Wechsel

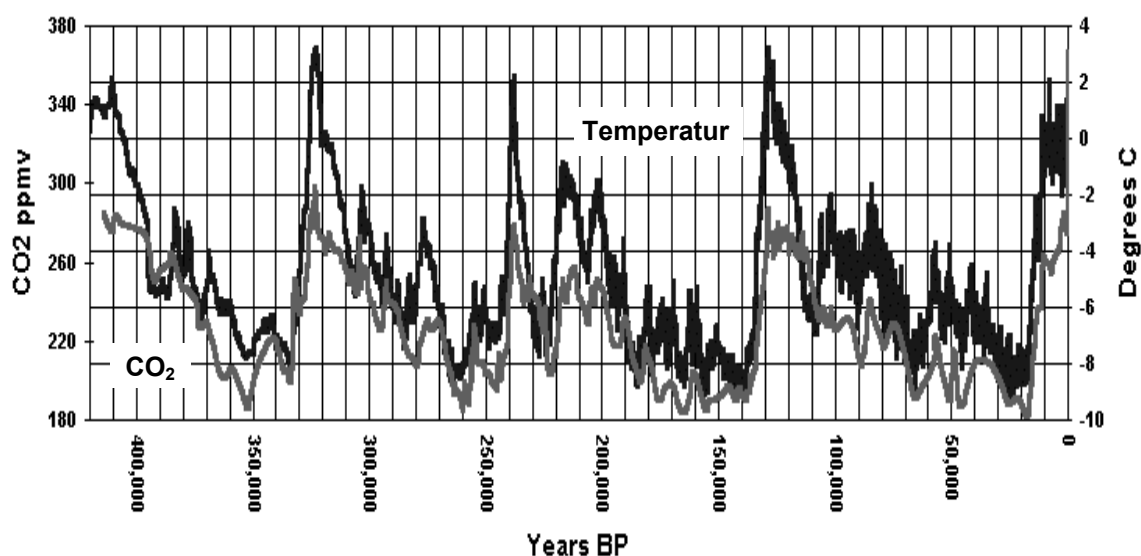


Abb. 3: Temperatur- und CO_2 -Kurve eines Eisbohrkerns aus Vostok (Antarktika) für vier Eiszeit-Warmzeit-Perioden (BARNOLA et al. 2003).

Eiszeit-Warmzeit viermal hintereinander mit jeweils etwa gleicher Amplitude der Temperatur sowie des CO_2 -Gehaltes der atmosphärischen Luft vollzogen hat.

Die Tatsache, dass der CO_2 -Inhalt der Atmosphäre sich gerade mitten im ^{14}C -Datierungszeitraum nahezu sprunghaft geändert hat, muss hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf ^{14}C -Alter untersucht werden.

3 Der Pleistozäne CO_2 -Speicher

Der Kohlendioxidgehalt der Luft ist im Verlauf einer Eiszeit innerhalb von ca. 100.000 Jahren von anfangs 290 ppm allmählich auf 190 ppm abgesunken und nach deren Ende wieder auf das ursprüngliche Niveau angestiegen (Abb. 2). Die der Atmosphäre jeweils entzogene CO_2 -Masse beträgt knapp 260 Gt Kohlenstoff entsprechend 950 Gt CO_2 (Abb. 4).

Die Zeitkonstante für den Übergang von atmosphärischem CO_2 in den gesuchten Kohlenstoffspeicher muss in der Größenordnung von 100.000 Jahren liegen. Sie ist jedenfalls viel größer als alle im CO_2 -Austauschsystem wirkenden Zeitkonstanten (z.B. Oberflächenwasser – Tiefsee ca. 1.000 Jahre (Abb. 4).

Als wahrscheinlichste Hypothese gilt, dass sich

im Schelfbereich des pleistozänen Ozeans eine starke Entwicklung der ozeanischen Biosphäre (Foraminiferen) vollzog (BROECKER 1988; BROECKER 1996). Als Argument wird u.a. die Verschiebung des ^{13}C -Verhältnisses im Meeres- CO_2 zu positiven Werten hin genannt, was sich als Folge des bei der Assimilation auftretenden Isotopieeffektes (Bevorzugung des leichteren Kohlenstoffisotops ^{12}C) verstehen lässt. Wenn dieser Kohlenstoffspeicher am Eiszeitende abgebaut wird (warum), überträgt sich insbesondere auch sein ^{14}C -Gehalt auf das freigesetzte CO_2 , das den Ozean wieder verlässt.

4 Auswirkungen auf ^{14}C -Alter

Der ^{14}C -Gehalt des aus dem Ozean in die Atmosphäre abgegebenen CO_2 muss etwa 80...90 pmC betragen haben; dies ist der für ozeanisches CO_2 typische Wertebereich (PENG & BROECKER 1992). Der ^{14}C -Gehalt des atmosphärischen CO_2 muss infolge dessen während des Übergangs von der Eiszeit zur Warmzeit abgenommen haben. Rechnerisch ergibt sich bei einer Mischung von 30% Ozean- CO_2 und 70% Luft- CO_2 (mit 100 pmC) ein ^{14}C -Anfangsgehalt von 95 pmC. Das Eiszeitende sollte folglich in Dendrokorrekturkurven oder beim Vergleich von U–Th-Altern mit ^{14}C -Altern temporär an zu hohen Radiokohlenstoffaltern sichtbar sein.

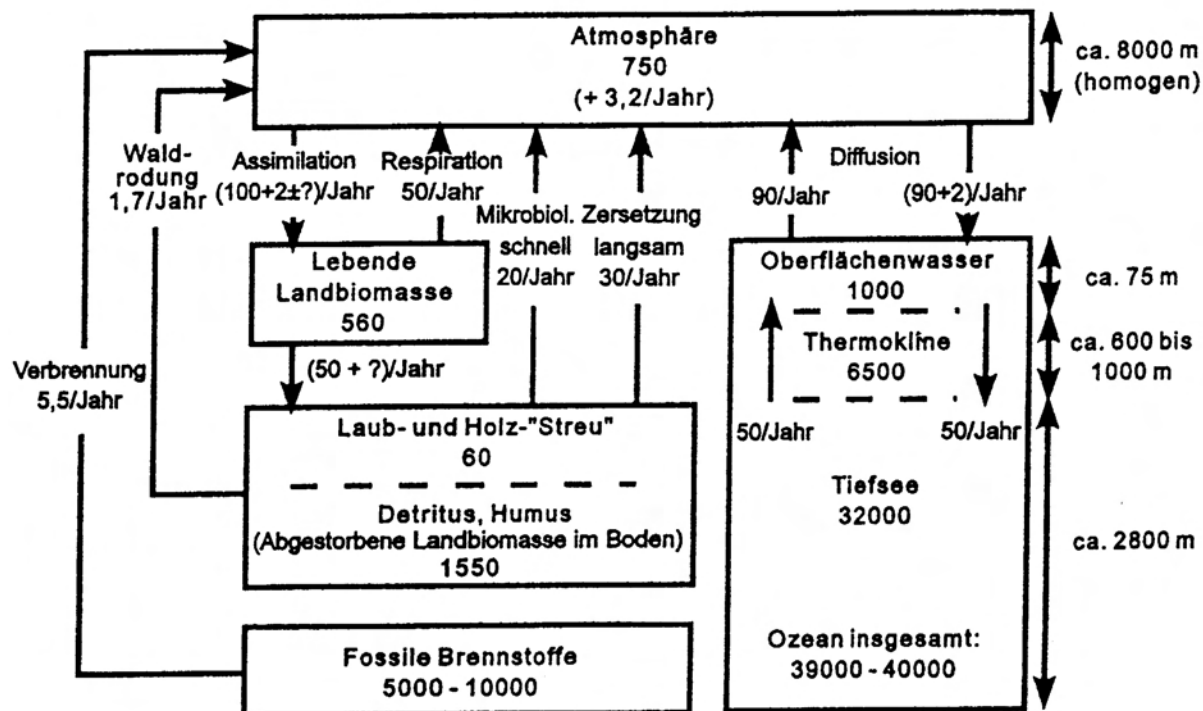


Abb. 4: CO_2 -Austausch zwischen Atmosphäre, Biosphäre und Ozean – Inventar in Gt C, Flüsse in Gt C/a (ROEDEL 2000).

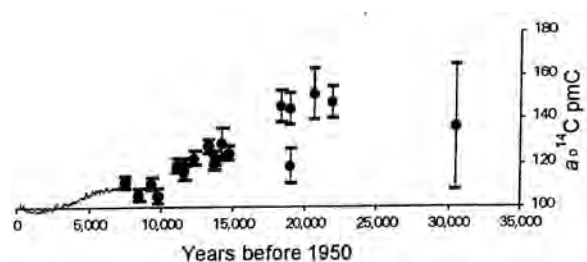


Abb. 5: Zeitliche Veränderung des C-14-Anfangsgehaltes aus (CLARK & FRITZ 1997) nach (BARD et al. 1993).

Wie Abb. 5 zeigt, ist dieser Effekt offenbar durch eine signifikant erhöhte ^{14}C -Produktion überdeckt, die als Folge eines kleineren Dipolmomentes des Magnetfeldes der Erde interpretiert wird (STERNBERG 1992).

Unterdessen wurde für den Zeitraum zwischen 10.000 a.B.P. und 45.000 a.B.P. eine ^{14}C -Kalibrierkurve angegeben, die eine hinreichend gute Übereinstimmung zwischen kalendarischen Alter und ^{14}C -Alter belegt (KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998; JÖRIS & WENINGER 2000).

Dank

Der Verfasser bedankt sich bei Herrn H. Fritz für die technische Anfertigung des Manuskriptes.

Literatur

- BARD, E., ARNOLD, M., FAIRBANKS, R.G. & HAMELIN, B. (1993): Th-230, U-234 and C-14-Dates obtained by mass spectrometry on corals. – Radiocarbon 35 (1993) p.191–199.
- BARD, E., HAMELIN, B., FAIRBANKS, R. & ZINDLER, A. (1990): Calibration of the ^{14}C Timescala over the past 30.000 years using Mass Spectrometric U-Th ages from Barbados Corals. – Nature, Vol.345 (1990) p.405–410.
- BARNOLA, J., RAYNAUD, D., LORIUS, C. & BAR-KOV, N. I. (2003): Historical CO_2 Record from the Vostok Ice Core, in: Trends: A Compendium of data on Global Change. – Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA.
- BECK, J. W. et al. (2001): Extremely Large variations of Atmospheric ^{14}C Concentration during the Last Glacial Period. – Science 292 (2001) p.2453–2458.
- BECKER, B. (1993): A 11000-year German Oak and Pine dendrochronology for radiocarbon calibration. – Radiocarbon 35 (1993) p.201–213.
- BERGER, R. & MARSHALL-LIBBY, L. (1980): Radiocarbon and Tritium – Publications of Willard Frank Libby. – Geo Science Analytical, Santa Monica, USA.
- BROECKER, W.S. (1988): Der Ozean, S.144–155 in: Die Dynamik der Erde. – Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg.
- BROECKER, W.S. (1996): Plötzliche Klimawechsel, S.86–93. – Spektrum der Wissenschaft 1/1996, Heidelberg.
- BUCHA, V. (1970): Influence of the Earth Magnetic Field on Radiocarbon dating, p.501–511. – Radiocarbon Variations and Absolute Chronology, Almquist & Wiksells, Uppsala.
- CLARK, J. & FRITZ P. (1997): Environmental Isotopes in Hydrogeology. – Lewis Publishers, Boca Raton, New York.
- DANSGAARD, W. et al. (1971): Climatic record Revealed by the Camp Century Ice Core. – The Late Cenozoic Glacial Ages, Yale University, 1971, p.37–56.
- DEVRIES, H. (1958): Variation in Concentration of Radiocarbon with Time and Location on Earth. – Kon. Ned. Akad. Wet., Proc. Ser. B 61 p.94–102.
- FLOHN, H. (1984): Das CO_2 -Klima-Problem und die Rolle biologischer Vorgänge. – Biologie in unserer Zeit 14 (1984) S.42–47.
- GRIESER, J., STAEGER, T. & SCHÖNWIESE, CH.-D. (2000): Statistische Analysen zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen auf Grund des anthropogenen Treibhauseffektes. – Ber. Inst. Meteorol. Geophys. Uni Frankfurt/Main Nr.103.
- HOUTERMANS, J., SUESS, H. E. & MUNK, W. (1967): The Effect of Industrial Fuel Combustion on the Carbon-14-Level of Atmospheric CO_2 , p.57–68 – Radioactive Dating and Methods of Low-Level Counting, IAEA Vienna.
- JOHNSEN, S. J. et al. (1972): Oxygen Isotope through the Antarctic and Greenland Ice Sheets. – Nature 235 (1972) p.429–434.
- JÖRIS, O. & WENINGER, B.(2000): Towards an Absolute Chronology of the Last Glacial. – Journal of Quaternary Science, RAPID COMMUNICATION (2000) p.1–3.
- KITAGAWA, H. & VAN DER PLICHT, J. (1998): Atmospheric Radiocarbon Calibration to 45.000 yr B.P. – Science 279 (1998) p.1187–1190.

- KONDRATYEV, K. YA. (1969): Radiation in the Atmosphere. – Academic Press, New York, London.
- MANABE, S. & WETHERALD, R. T. (1975): The Effects of Doubling the CO₂ Concentration on the Climate of a General Circulation Model. – *Journal of the Atmosphere Sciences* 32 (1975) p.3—15.
- PEARSON, G. W. et al. (1986): High-precision ¹⁴C measurement of Irish oaks to show the natural ¹⁴C variations from AD 1840 to 5210 B.C. – *Radiocarbon* 28 (1986) p.911—934.
- PEARSON, G. W., BECKER, B. & QUA, F. (1993): High-precision ¹⁴C measurement of German oaks to show the natural ¹⁴C variations from 7980 to 5000 B.C. – *Radiocarbon* 35 (1993) p.93—104.
- PENG, T.-H. & BROECKER, W.S. (1992): Reconstruction of Radiocarbon Distribution in the Glacial Ocean, p.75—92 in: TAYLOR, R. E. et al. (Eds.), *Radiocarbon after Four Decades*. – Springer, New York.
- ROEDEL, W. (2000): Physik unserer Umwelt – Die Atmosphäre, 3.Auflag. – Springer, Berlin, Heidelberg.
- SONETT, C. P. (1992): The Present Status of Understanding of the Long-Period spectrum of Radiocarbon, p.50—61 in: TAYLOR, R. E. et al. (Eds.), *Radiocarbon after Four Decades* – Springer, New York.
- STERNBERG, R. S. (1992): Radiocarbon Fluctuations and the Geomagnetic Field, p.93—119 in: TAYLOR, R. E. et al. (Eds.), *Radiocarbon after Four Decades*. – Springer, New York.
- STUIVER, M. (1982): A high-precision calibration of the AD radiocarbon timescale. – *Radiocarbon* 24 (1982) p.1—26.
- WIGLEY, T. M. L. (1987): Relative Contributions of Different Trace Gases to the Greenhouse Effect. – *Climate Monitor* 16 (1987) p.14—28.