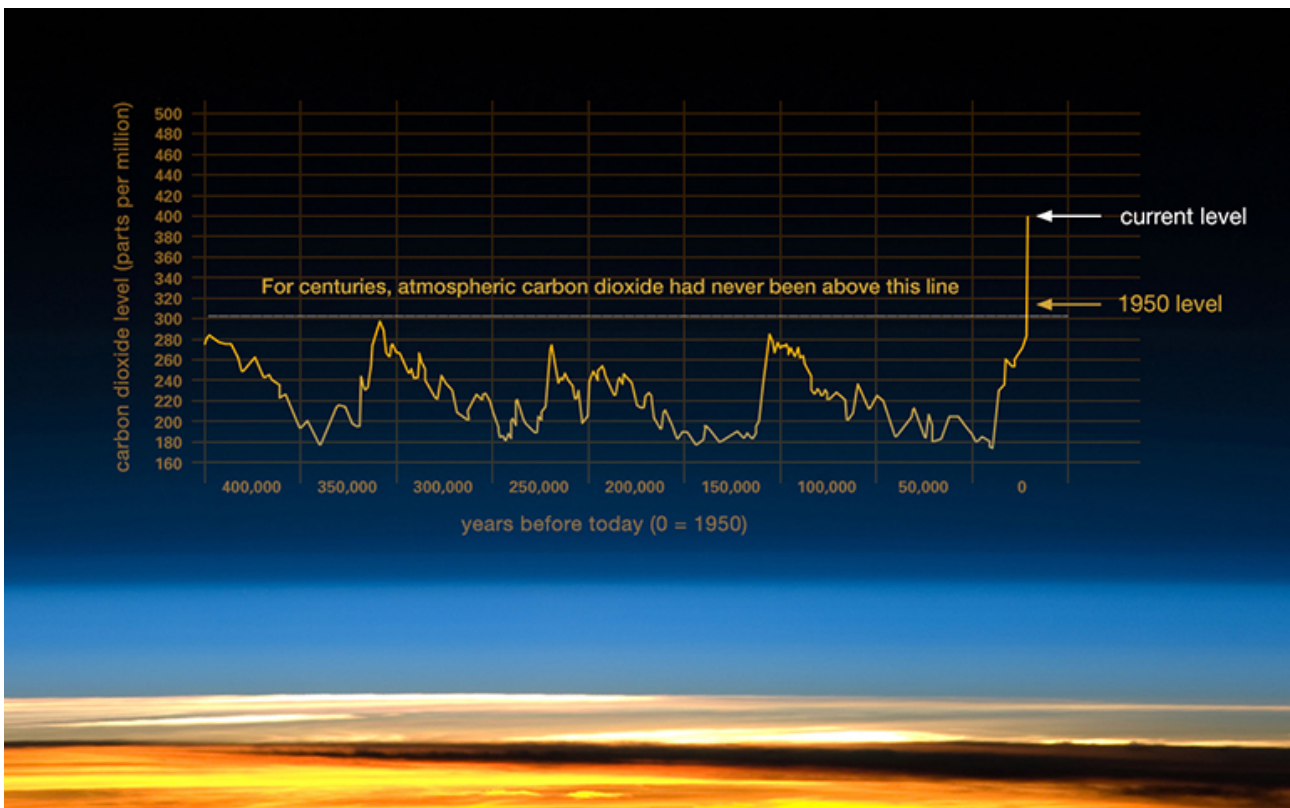


Hockeyschläger brechen: Antarktische Eiskern-Edition

geschrieben von Chris Frey | 21. August 2023

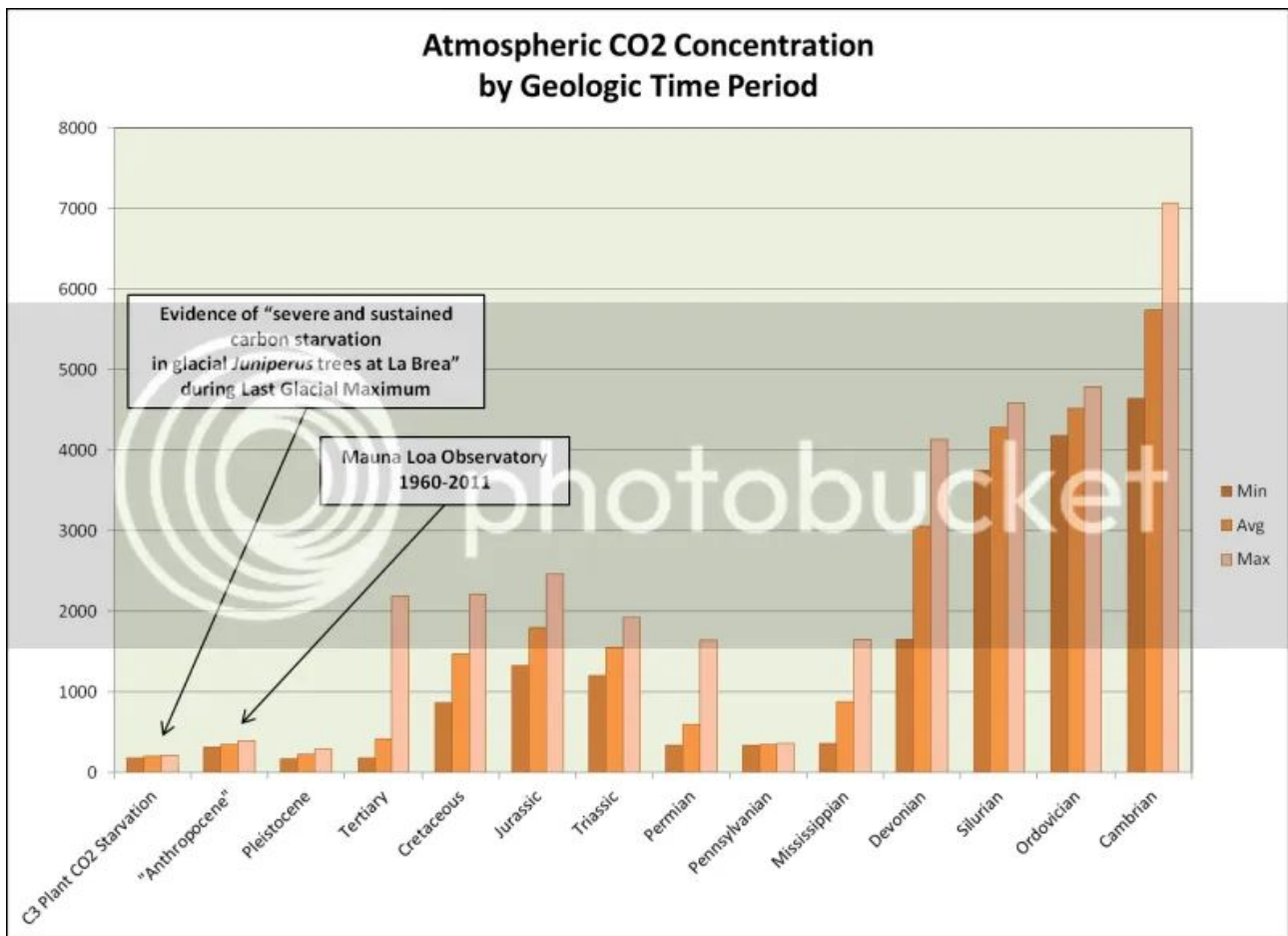
[David Middleton](#)

Vorbemerkung des Übersetzers: Dieser Beitrag datiert zwar schon vor sechs Jahren, ist aber so grundlegend und bedeutsam, dass die EIKE-Redaktion ihn zur Übersetzung vorgeschlagen hat. Es geht um den historischen Verlauf des CO₂-Gehaltes der Luft in geologischen Zeiträumen. Da es absolut nicht ins Narrativ passt, dass der CO₂-Gehalt erdgeschichtlich gesehen fast durchweg viel höher lag als heute, ohne dass die Erde übergekocht ist [Antonio Guterres!], musste natürlich gemogelt werden, was das Zeug hält. Gleich die erste Graphik zeigt dies:



Quelle: [NASA](#) [aus dem Beitrag]

In einem Kommentar stellt Autor David Middleton dieser Darstellung eine höchstwahrscheinlich korrekte Darstellung gegenüber, die hier im Zusammenhang gleich mit gezeigt wird:



Quelle: dieser [Kommentar](#)

Mit Bezug auf obige NASA-Graphik leitet Middleton seinen Beitrag mit einem Zitat ein.

Ende Vorbemerkung

Grafik: Der unaufhaltsame Anstieg des Kohlendioxids

Alte Luftblasen, die im Eis eingeschlossen sind, ermöglichen es uns, in der Zeit zurückzureisen und zu sehen, wie die Erdatmosphäre und das Klima in der fernen Vergangenheit aussahen. Sie verraten uns, dass der Kohlendioxidgehalt (CO₂) in der Atmosphäre derzeit höher ist als zu jedem anderen Zeitpunkt in den letzten 400 000 Jahren. Während der Eiszeiten lag der CO₂-Gehalt bei etwa 200 Teilen pro Million (ppm) und während der wärmeren Zwischeneiszeiten bei etwa 280 ppm (siehe Schwankungen in der Grafik). Im Jahr 2013 überstieg der CO₂-Gehalt zum ersten Mal in der aufgezeichneten Geschichte die 400 ppm-Marke. Dieser jüngste unaufhaltsame CO₂-Anstieg steht in einem bemerkenswert konstanten Zusammenhang mit der Verbrennung fossiler Brennstoffe und lässt sich gut erklären, wenn man davon ausgeht, dass etwa 60 Prozent der Emissionen fossiler Brennstoffe in der Luft bleiben.

Wir stehen heute an der Schwelle eines neuen geologischen Zeitalters, das manche als „Anthropozän“ bezeichnen, in dem das Klima ganz anders ist als das, das unsere Vorfahren kannten.

[Bla, bla, bla...]

[NASA](#)

Wir haben alle schon Variationen dieses Mems gehört... ad nauseum... Sie sagen uns, dass der Kohlendioxidgehalt (CO₂) in der Atmosphäre höher ist als zu irgendeinem Zeitpunkt in den letzten 400.000 – 800.000 – 2,5 Millionen – 20 Millionen Jahren.

Diese Behauptung stützt sich im Allgemeinen auf die Tatsache, dass die antarktischen Eiskerne zu keinem Zeitpunkt in den letzten 800.000 Jahren einen interglazialen CO₂-Gehalt von mehr als 280-300 ppm aufweisen. Dies ist zwar richtig, aber sagt uns das tatsächlich, dass der atmosphärische CO₂-Gehalt in der vorindustriellen Zeit nicht deutlich über 300 ppm gelegen haben kann?

WAIS-Scheide und die Auswirkungen der Auflösung auf die Amplitude

Eiskern des Westantarktischen Eisschildes

Am 1. Dezember 2011 erreichte das von der National Science Foundation finanzierte WAIS-Divide-Eiskernprojekt (West Antarctic Ice Sheet WAIS) seine endgültige Tiefe von 3405 Metern und zog damit den bisher längsten US-Eiskern aus den Polarregionen. Die Eiszyylinder mit einem Durchmesser von 12,2 Zentimetern, aus denen der Eiskern besteht, enthalten einzigartig detaillierte Informationen über die Umweltbedingungen der letzten 68.000 Jahre, wie z. B. die atmosphärische Konzentration von Treibhausgasen, die Temperatur der Oberflächenluft, Windmuster, die Ausdehnung des Meereises um die Antarktis und die durchschnittliche Temperatur des Ozeans. Die erfolgreiche Bergung des Eiskerns ist der Höhepunkt eines achtjährigen Projekts zur Erfassung des Paläoklimas in einem der entlegensten Teile des antarktischen Kontinents.

[...]

Im Eiskern des WAIS kann jeder der vergangenen 30.000 Jahre Schneefall in einzelnen Eisschichten identifiziert werden, wobei die Aufzeichnungen mit geringerer zeitlicher Auflösung bis 68.000 Jahre vor der Gegenwart reichen. Da die Eiskernaufzeichnungen eine Untersuchung des vergangenen Klimas in jährlicher Auflösung ermöglichen, helfen sie den Wissenschaftlern zu verstehen, warum sich das Klima abrupt ändern kann und wie sich das Klima im kommenden Jahrhundert entwickeln könnte.

Andere Eiskernprojekte haben Bohrkerne mit geringerer zeitlicher Auflösung hervorgebracht, die zeigen, dass der derzeitige Gehalt an Treibhausgasen in der Atmosphäre, zurückzuführen auf die Verbrennung

fossiler Brennstoffe, der höchste seit mindestens 800 000 Jahren ist. Das Eis aus dem Eiskern von WAIS Divide, zwischen 30.000 und 68.000 Jahre alt, enthält zwar keine Aufzeichnungen mit jährlicher Auflösung, aber eine höhere zeitliche Auflösung als frühere Projekte.

[...]

WAIS Divide

Die folgende darin enthaltene Aussage erregte meine Aufmerksamkeit:

Andere Eiskernprojekte haben Bohrkerne mit geringerer zeitlicher Auflösung hervorgebracht, die zeigen, dass der derzeitige Gehalt an Treibhausgasen in der Atmosphäre, zurückzuführen auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe, der höchste seit mindestens 800 000 Jahren ist

Dies wirft die Frage auf: Sind die Eisbohrkerne „mit geringerer zeitlicher Auflösung“ in der Lage, Verschiebungen des atmosphärischen CO₂ im Jahrhundertmaßstab aufzulösen? Wenn nicht, dann ist die Schlussfolgerung, „dass das derzeitige Niveau der atmosphärischen Treibhausgase, das auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe zurückzuführen ist, das höchste seit mindestens 800.000 Jahren ist“, nicht belegt.

Die Eiskerne können keine CO₂-Verschiebungen aufklären, die in Zeiträumen auftreten, die kürzer sind als das Doppelte der Periode, in der die Blase eingeschlossen ist.

Nach Neftel et al. (1988) können CO₂-Fluktuationen mit einer Dauer von weniger als der doppelten Zeit des Blaseneinschlusses (entspricht etwa 134 Kalenderjahren im Fall des Byrd-Eises und bis zu 550 Kalenderjahren im Dome Concordia) weder im Eis nachgewiesen noch durch Entfaltung rekonstruiert werden. – McElwain et al., 2001

Hier ist ein schematisches Diagramm des Blaseneinfangprozesses für den Eiskern DE08:

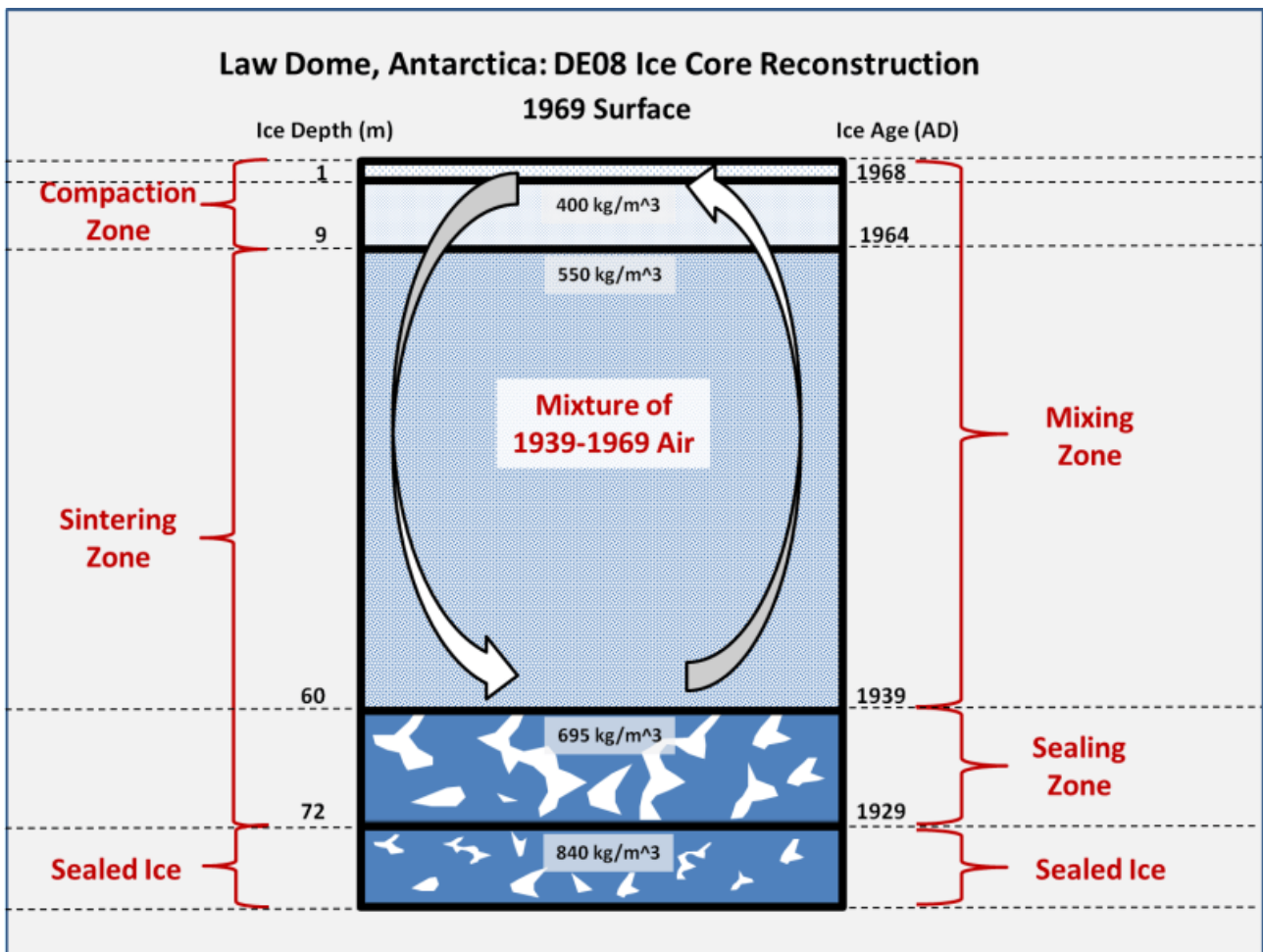


Abbildung 1. Schematisches Diagramm des Blaseneinschlusses am Law Dome, Eiskern DE08.

Der DE08-Kern hat eine Auflösung von mindestens 30 Jahren, möglicherweise sogar nur 10 Jahren.

Ahn et al. (2012) verglichen die Auflösungen der Eiskerne WAIS Divide, Law Dome DE08 und Dronning Maud Land über die letzten 1000 Jahre und stellten wenig überraschend fest, dass der Kern mit der höchsten Auflösung (DE08) den größten Amplitudenbereich aufweist und einen starken, kurzzeitigen Rückgang des atmosphärischen CO₂ während des Tiefpunkts der Kleinen Eiszeit (ca. 1610 n. Chr.) auflöste.

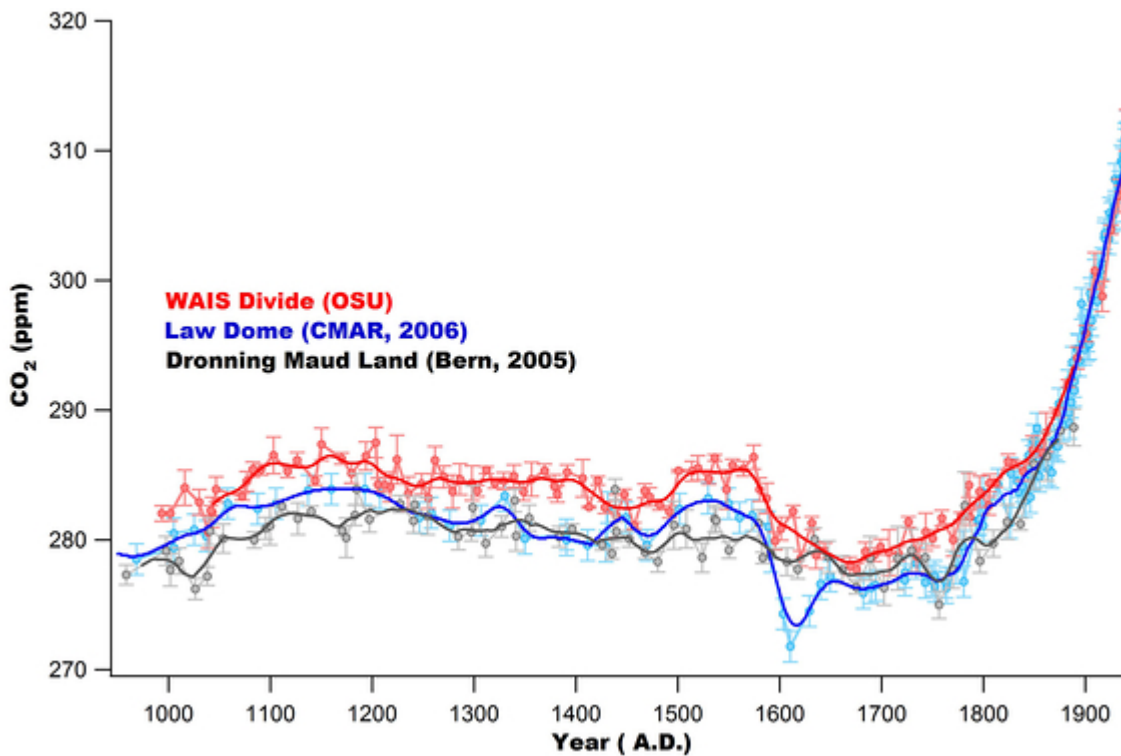


Abbildung 2. Aus Ahn et al., 2012: „Atmospheric CO₂ for the last 1000 years“. WAIS Divide Daten (rot, diese Studie) werden mit denen des Law Dome (blau) [Etheridge et al., 1996; MacFarling Meure et al., 2006] und EPICA Dronning Maud Land (schwarz) [Siegenthaler et al., 2005] verglichen.

Zu dieser Grafik: Um den Vergleich der CO₂-Aufzeichnungen zu erleichtern, wurde ein Gauß-Filter ($1\sigma = 10$ Jahre) auf interpolierte jährliche Datensätze (dunklere Linien) angewendet. OSU steht für die Oregon State University und CMAR für CSIRO Marine and Atmospheric Research. Die Auflösung des DE08-Eiskerns ist so gut, dass er sogar eine Pause, möglicherweise sogar einen Rückgang des atmosphärischen CO₂ während der Abkühlungsperiode Mitte des 20. Jahrhunderts identifiziert haben könnte.

Die Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration in den 1940er und 1950er Jahren ist ein bemerkenswertes Merkmal in den Eiskernaufzeichnungen. Die neuen Messungen mit hoher Dichte bestätigen dieses Ergebnis und zeigen, dass sich die CO₂-Konzentration zwischen 1940 und 1955 bei 310-312 ppm stabilisierte. Die CH₄- und N₂O-Wachstumsraten nahmen in diesem Zeitraum ebenfalls ab, wobei die N₂O-Schwankungen mit der Messunsicherheit vergleichbar sind. Durch die Glättung aufgrund des Einschlusses von Luft im Eis (etwa 10 Jahre bei DE08) werden hochfrequente Schwankungen aus der Aufzeichnung entfernt, so dass die tatsächlichen atmosphärischen Schwankungen möglicherweise größer waren als in der Aufzeichnung der Eiskernluft dargestellt. Sogar ein Rückgang der atmosphärischen CO₂-Konzentration in der Mitte der 1940er Jahre steht im Einklang mit der Law Dome-Aufzeichnung und der Glättung der Lufteinschlüsse, was auf eine große zusätzliche Senke von

$\sim 3,0 \text{ PgC yr}^{-1}$ hindeutet [Trudinger et al., 2002a]. Die $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ -Aufzeichnungen aus dieser Zeit deuten darauf hin, dass diese zusätzliche Senke hauptsächlich ozeanisch war und nicht durch geringere fossile Emissionen oder die terrestrische Biosphäre verursacht wurde [Etheridge et al., 1996; Trudinger et al., 2002a]. Die Prozesse, die diese Reaktion verursachen könnten, sind noch unbekannt.

[11] Die CO_2 -Stabilisierung erfolgte während eines Wechsels von anhaltenden El-Niño- zu La-Niña-Bedingungen [Allan und D'Arrigo, 1999]. Dies fiel zusammen mit einem Wechsel zwischen warmen und kalten Phasen der Pazifischen Dekadischen Oszillation [Mantua et al., 1997], niedrigeren Temperaturen [Moberg et al., 2005] und einer zunehmenden Abschwächung der nordatlantischen thermohalinen Zirkulation [Latif et al., 2004]. Die kombinierte Auswirkung dieser Faktoren auf die Spurengasbudgets ist derzeit noch nicht gut bekannt. Sie könnten für die atmosphärische CO_2 -Konzentration von Bedeutung sein, wenn die Flüsse in Gebieten, die Kohlenstoff aufnehmen, wie z. B. der Nordpazifik, verstärkt werden, oder wenn der Abfluss aus den Tropen unterdrückt wird. – MacFarling Meure et al., 2006

Von etwa 1940 bis 1955 gelangten etwa 24 Milliarden Tonnen Kohlenstoff direkt aus den Auspuffrohren in die Ozeane und/oder die Biosphäre:

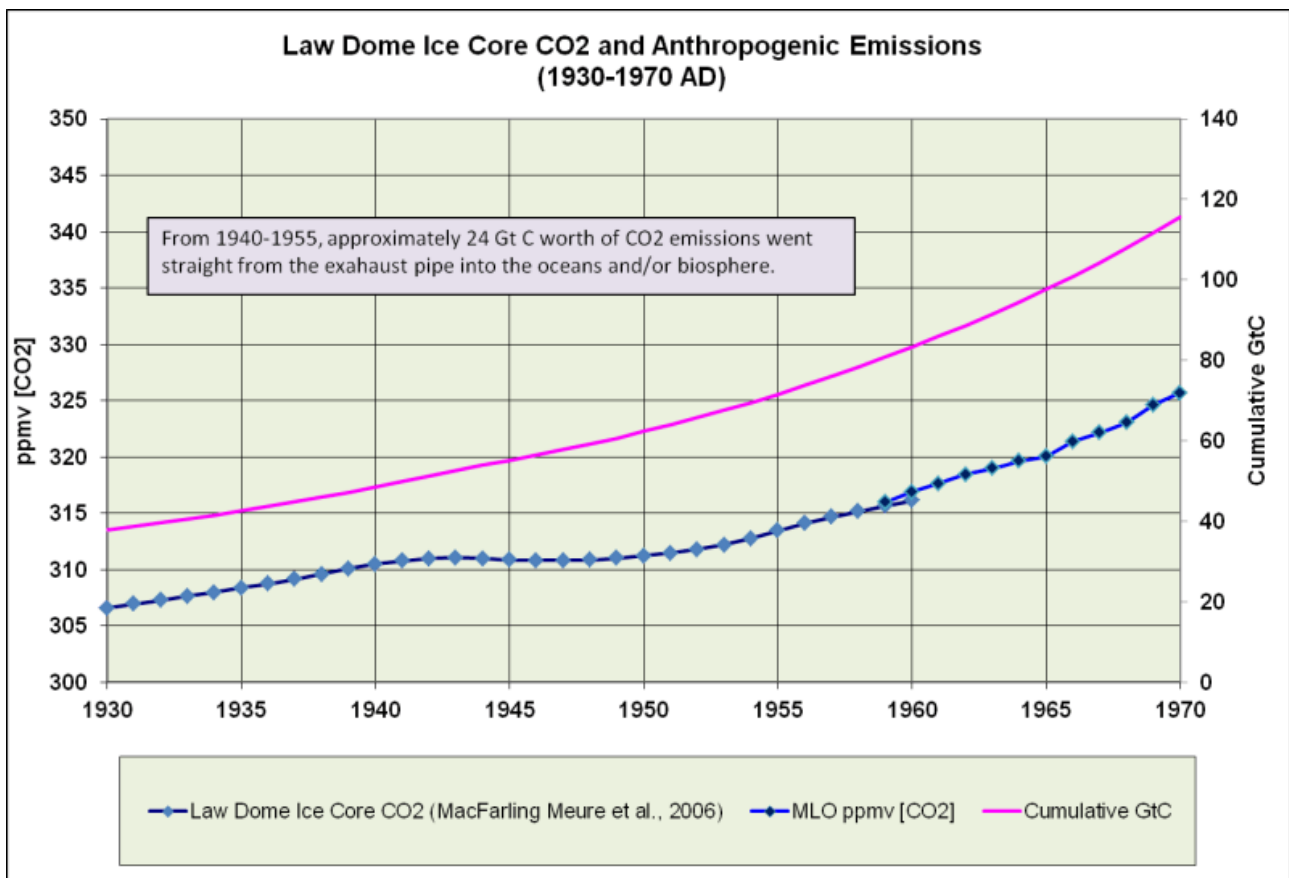


Abbildung 3. Der Law-Dome-Eiskern DE08 zeigt eine CO_2 -„Pause“ in der Mitte des 20. Jahrhunderts.

Ahn et al. (2012) konstruierten eine Reihe synthetischer Eiskerne mit unterschiedlicher Auflösung, um den Unterschied zwischen den DE08- und WAIS-Divide-Eiskernen bei der Auflösung des LIA-CO₂-Einbruchs um 1610 n. Chr. zu erklären:

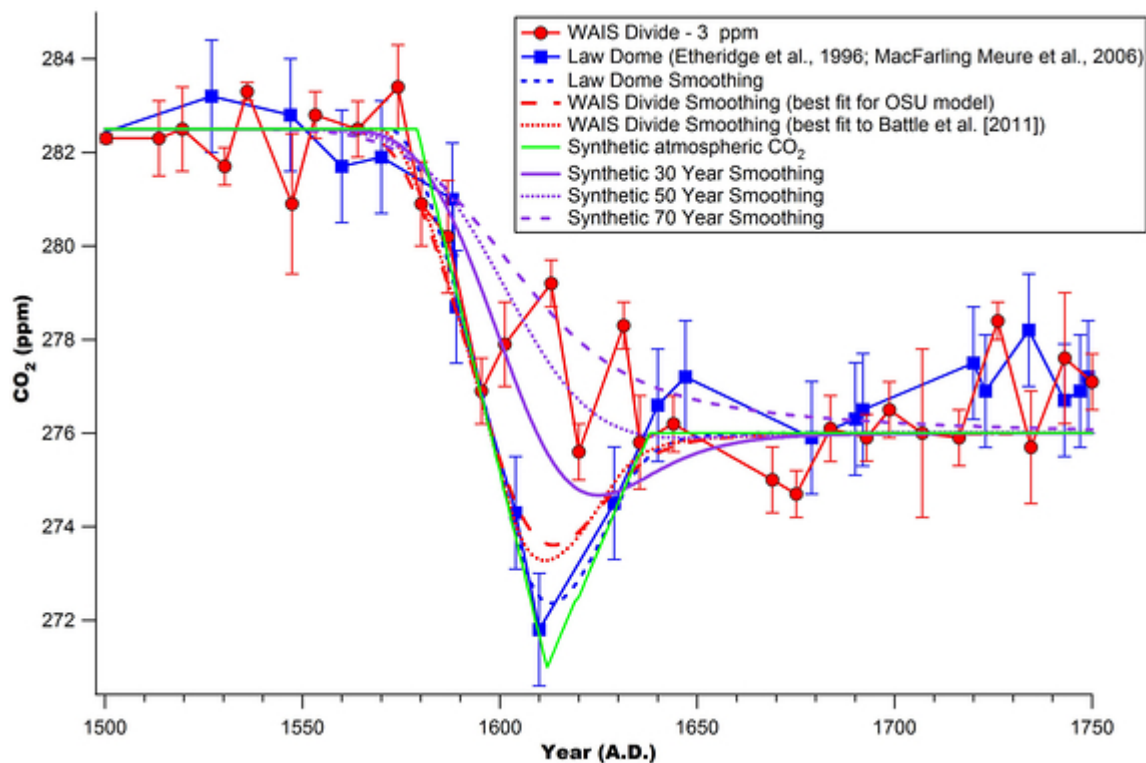


Abbildung 4. Aus Ahn et al., 2012: „Glättung einer imaginären atmosphärischen CO₂-Zeitreihe (grüne Linie). Die synthetische atmosphärische CO₂-Zeitreihe weist einen etwas stärkeren CO₂-Abfall auf als die Law Dome-Aufzeichnungen um ~1600 n. Chr. Um das Ausmaß des CO₂-Rückgangs um ~1600 n. Chr. besser vergleichen zu können, haben wir 3 ppm der CO₂-Konzentration von den WAIS Divide-Kernaufzeichnungen (blaue Linie) abgezogen und mit drei synthetischen Glättungskurven (lila Linien) verglichen.

Es besteht eine grundlegende Beziehung zwischen Frequenz und Amplitude. Wenn man einen Tiefpassfilter oder einen glättenden Durchschnitt auf eine Zeitreihe anwendet, schwächt man die Reaktion der Amplitude ab:

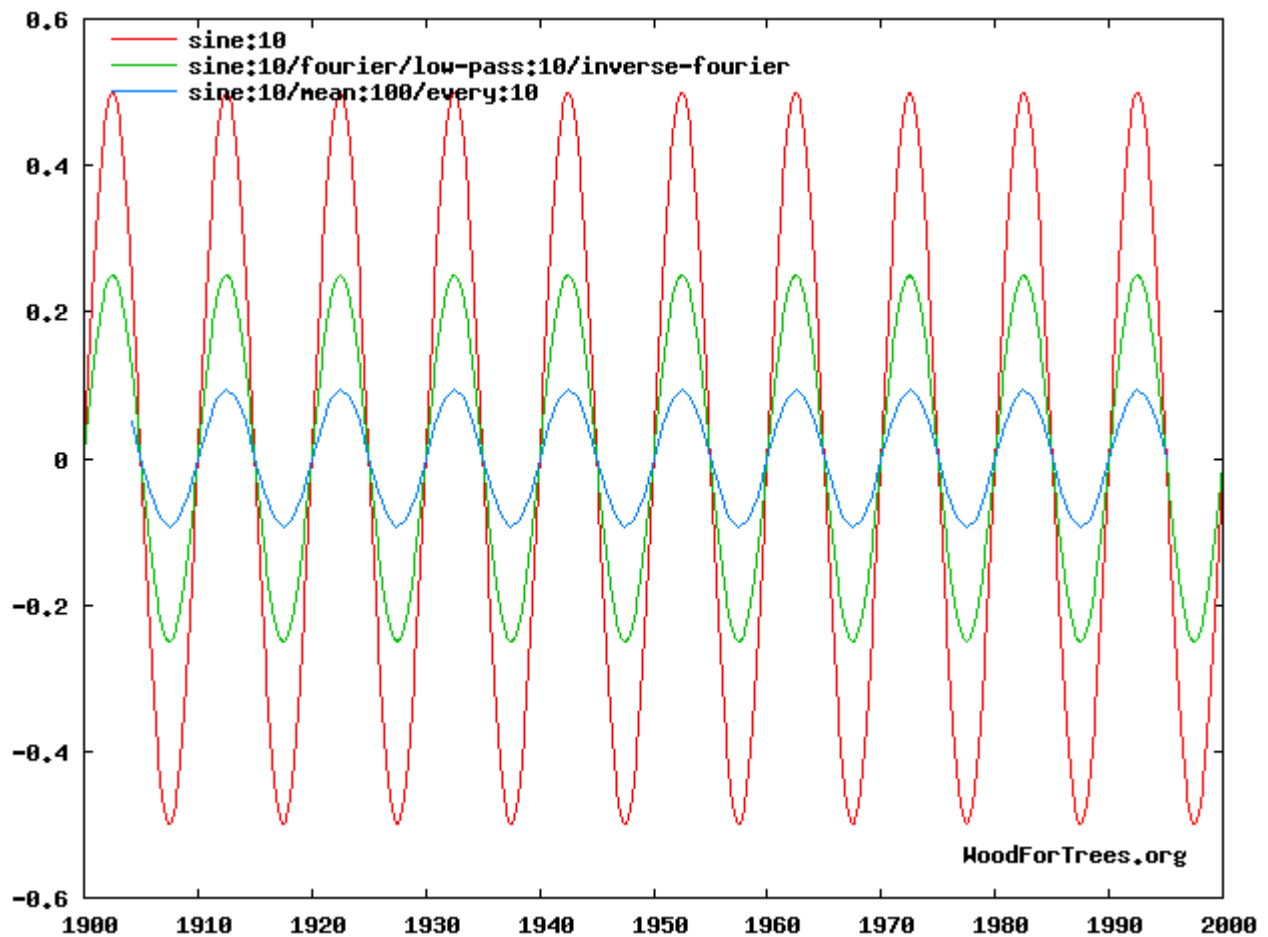


Abbildung 5. Sinuswelle mit angewandtem Tiefpassfilter und 10-pt-Glättungsdurchschnitt. Man beachte die Verringerung der Amplitude aufgrund der Filterung und/oder Glättung. (Quelle: [Wood for Trees](http://WoodforTrees.org))

Ein perfekter Hockeystick wird gebrochen

Ich habe eine zusammengesetzte CO₂-Aufzeichnung aus Eiskernen (0-800 kyr BP) von Bereiter et al. (2014) heruntergeladen und den Standard-CO₂-Hockeystick erstellt:

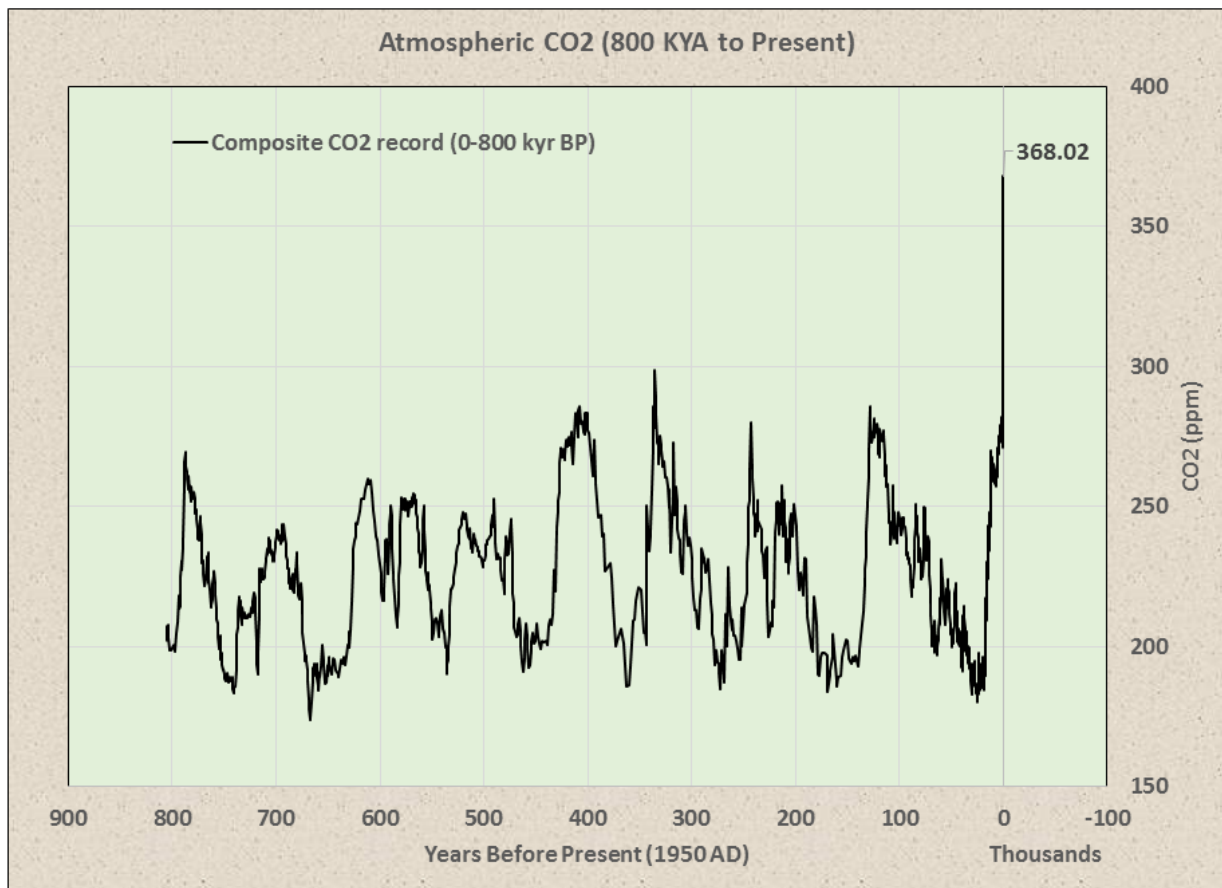


Abbildung 6. Zusammengesetzte CO₂-Aufzeichnung (0-800 kyr BP) aus Bereiter et al. (2014).

Dies ist ein Kompositum aus den folgenden Eiskernen:

-51-1800 yr BP:’	Law Dome (Rubino et al., 2013)
1.8-2 kyr BP:	Law Dome (MacFarling Meure et al., 2006)
2-11 kyr BP:	Dome C (Monnin et al., 2001 + 2004)
11-22 kyr BP:	WAIS (Marcott et al., 2014) minus 4 ppmv (see text)
22-40 kyr BP:	Siple Dome (Ahn et al., 2014)
40-60 kyr BP:	TALDICE (Bereiter et al., 2012)
60-115 kyr BP:	EDML (Bereiter et al., 2012)
105-155 kyr BP:	Dome C Sublimation (Schneider et al., 2013)
155-393 kyr BP:	Vostok (Petit et al., 1999)
393-611 kyr BP:	Dome C (Siegenthaler et al., 2005)
612-800 kyr BP:	Dome C (Bereiter et al., 2014)

Diese Eiskerne weisen eine sehr unterschiedliche Auflösung auf. Petit et al. (1999) geben an, dass die CO₂-Auflösung für Vostok 1.500 Jahre beträgt. Lüthi et al. (2008) geben für Dome C eine CO₂-Auflösung von etwa 500 Jahren an. Es scheint, dass der hochauflösende Law Dome DE08-Kern einfach an die älteren Eiskerne mit niedrigerer Frequenz angefügt wurde.

Wendet man auf den DE08-Eiskern Glättungsfilter an, um die Auflösung der niedriger aufgelösten Eiskerne anzugleichen, ergibt sich ein deutlich anderes Bild.

Unter Verwendung der Informationen in Tabelle 1 aus Ahn et al., 2012:

Ice Core Name	Mean Temp. (°C)	Acc. Rate (cm we/yr)	Ice-Gas Age Diff. (yr)	Gas Age Distribution (yr)	Reference for Gas Age Distribution
Dronning Maud Land	-44.6	6.4	835	59 ± 5	Siegenthaler et al. [2005]
DE-08 (Law Dome)	-19	110	31	10	Trudinger [2000]
DSS (Law Dome)	-22	60	58	14	Trudinger [2000]
WDC05A (WAIS Divide)	-31	22	205	≥30?	this study

Links in der rechten Spalte:

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011GB004247/full#gbc1882-bib-0053>

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011GB004247/full#gbc1882-bib-0062>

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011GB004247/full#gbc1882-bib-0062>

Ich habe die Beziehung zwischen der Eis-Gas-Alter-Differenz und der Gas-Alter-Verteilung aufgezeichnet und daraus eine Gas-Alter-Verteilung für den holozänen Teil des Vostok-Kerns berechnet:

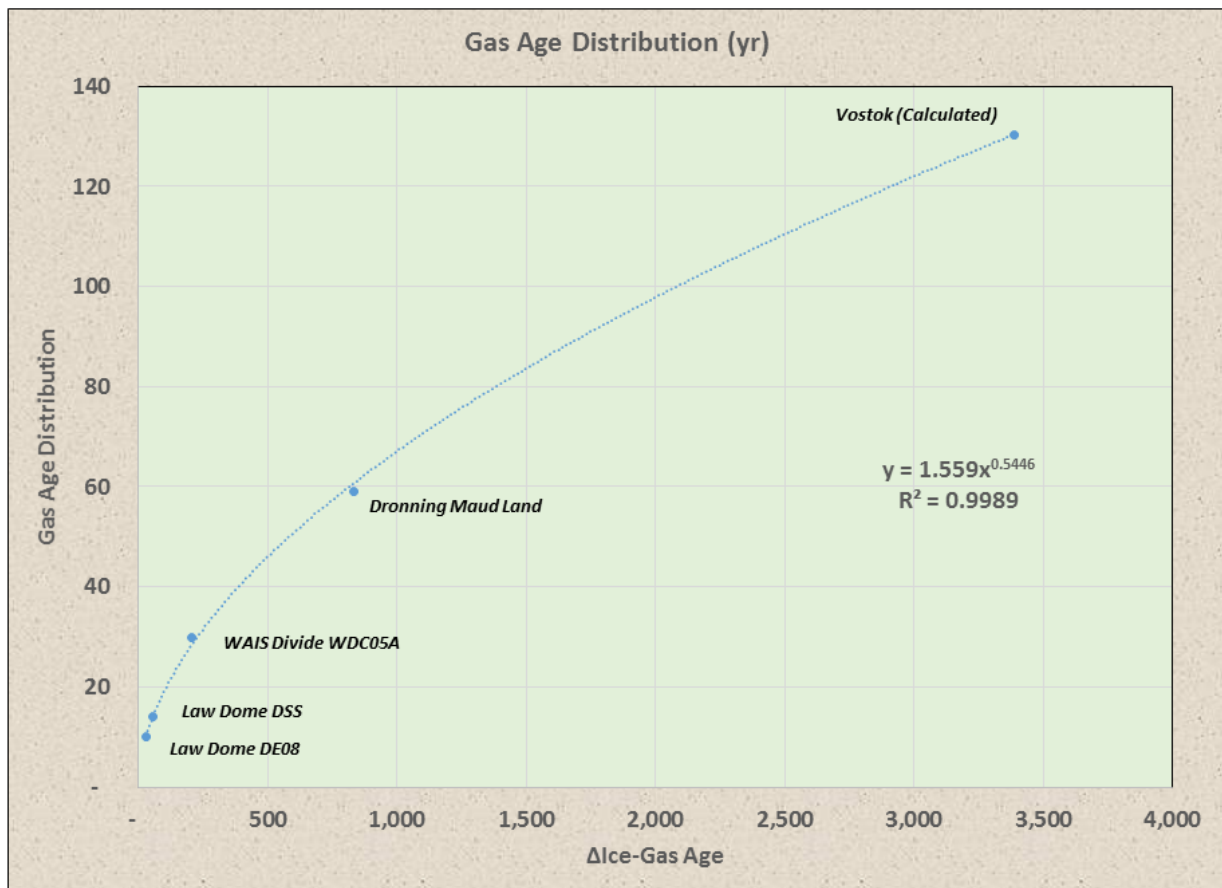


Abbildung 7: ΔIce-Gaszeitalter im Vergleich zur Gasaltersverteilung legt eine Gasaltersverteilung von 130 Jahren für den holozänen Teil des Vostok-Eiskerns nahe.

Die Anwendung eines 130-Jahre-Glättungsfilters auf den DE08-Kern ergibt einen Hockeyschläger mit einer stark verkürzten Klinge:

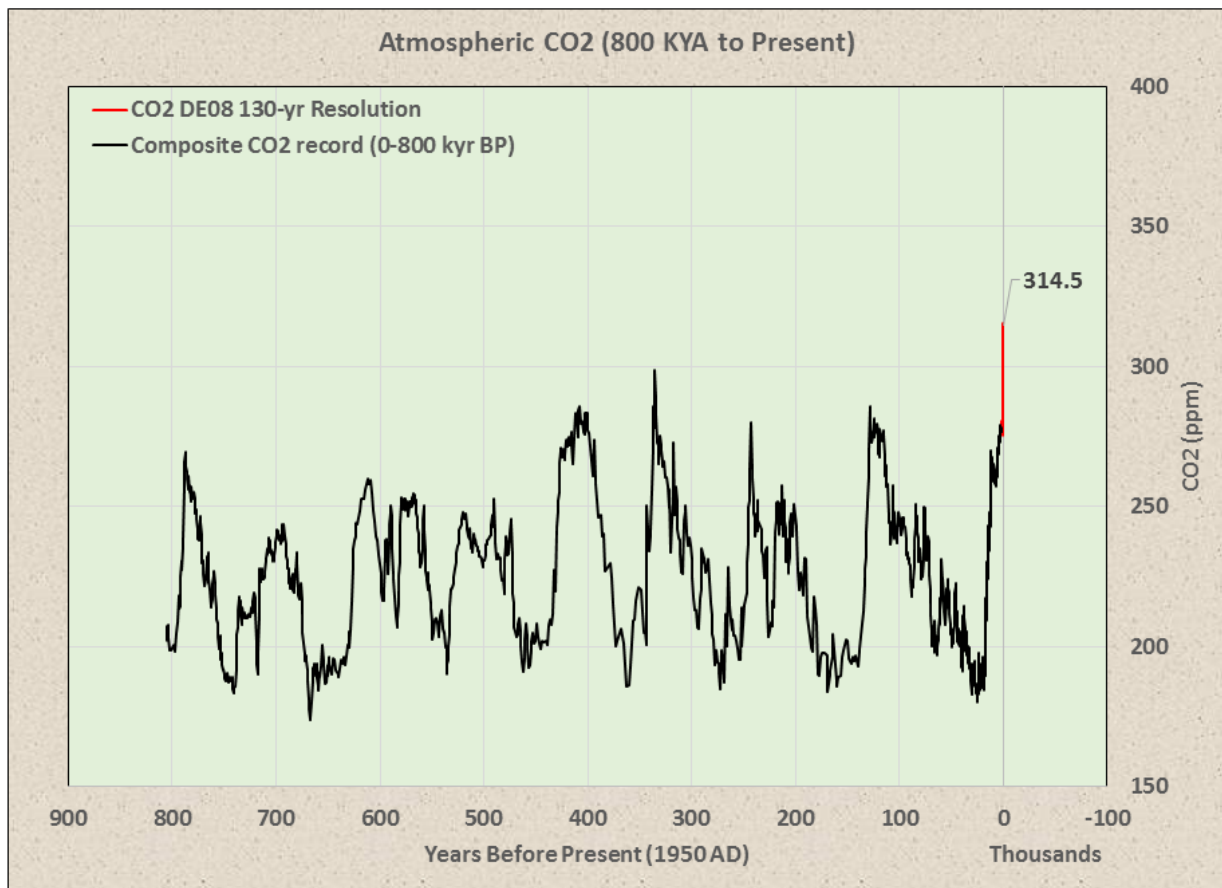


Abbildung 8. Ein 130-Jahres-Glättungsfilter lässt den CO₂-Anstieg im Industriezeitalter weit weniger anomal erscheinen.

Wenn ich einen 500-Jahres-Glättungsfilter verwende, verliert der Hockeystick seine Form vollständig:

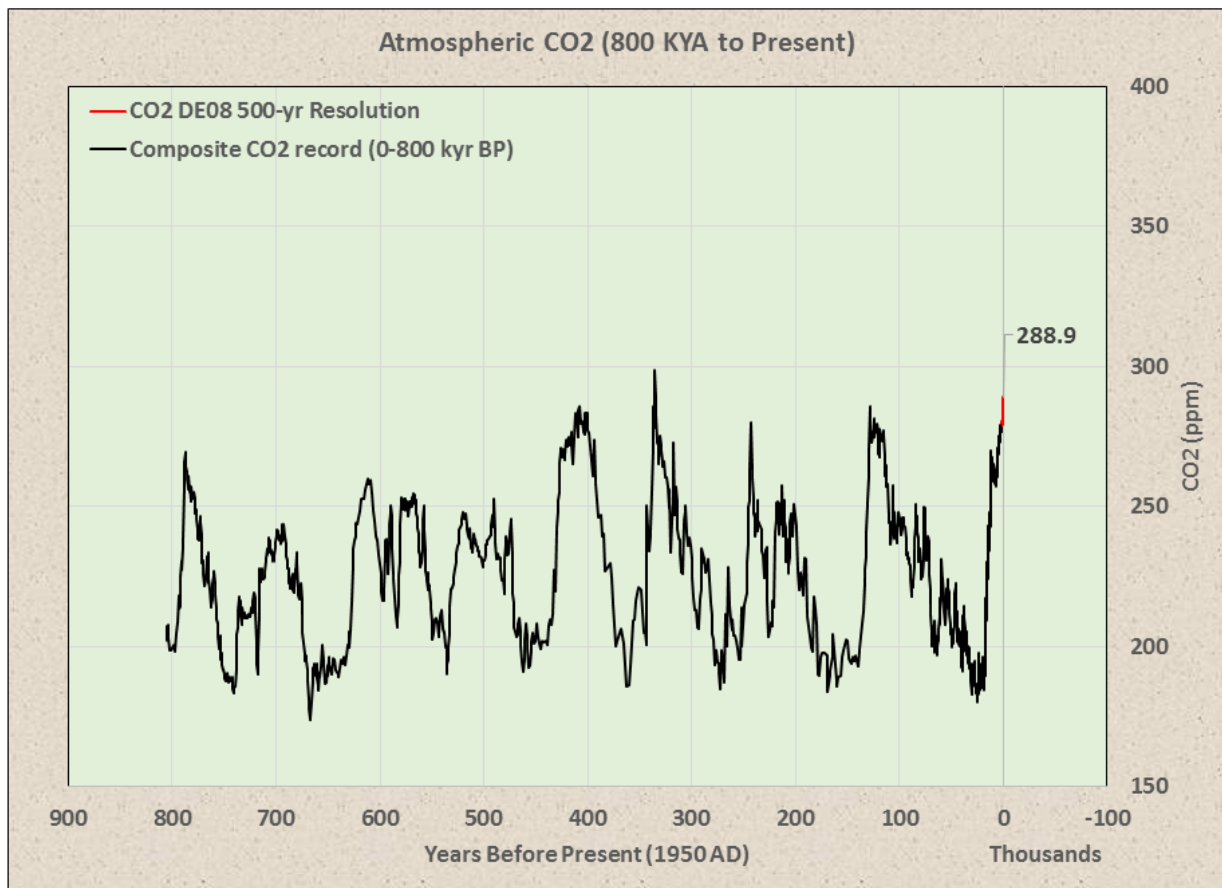


Abbildung 9. Ein 500-Jahre-Glättungsfilter entfernt die Klinge des Hockeysticks vollständig.

Ich habe nicht einmal versucht, den instrumentellen Datensatz zu verwenden, da es sich dabei um einen einzigen Datenpunkt mit der gleichen Auflösung wie bei den Vostok- und EPICA Dome C-Eiskernen handeln würde.

Schlussfolgerung

Die Eiskerne mit niedrigerer Frequenz sind nicht in der Lage, CO₂-Verschiebungen im Jahrhundertmaßstab aufzulösen. Daher können sie nicht verwendet werden, um die Möglichkeit kurzzeitiger Schwankungen auszuschließen, die mit dem Anstieg des atmosphärischen CO₂ im Industriezeitalter während des frühen Holozäns und Pleistozäns vergleichbar sind. Sie widersprechen also nicht den Schlussfolgerungen von Wagner et al. 1999:

Im Gegensatz zu den herkömmlichen Schätzungen von 270 bis 280 Teilen pro Million Volumenprozent (ppmv) in Eiskernen deutet das Signal der Stomatafrequenz darauf hin, dass die Kohlendioxid-Konzentration im frühen Holozän deutlich über 300 ppmv lag.

[...]

Die meisten der holozänen Eiskernaufzeichnungen aus der Antarktis haben keine ausreichende zeitliche Auflösung.

[...]

Unsere Ergebnisse widerlegen das Konzept der relativ stabilen holozänen CO₂-Konzentrationen von 270 bis 280 ppmv bis zur industriellen Revolution. SI-basierte CO₂-Rekonstruktionen könnten sogar darauf hindeuten, dass während des frühen Holozäns atmosphärische CO₂-Konzentrationen von 300 ppmv eher die Regel als die Ausnahme gewesen sein könnten.

Oder Wagner et al., 2004:

Die Mehrzahl der auf der Stomatafrequenz basierenden CO₂-Schätzungen für das Holozän unterstützen nicht das weithin akzeptierte Konzept vergleichsweise stabiler CO₂-Konzentrationen während der letzten 11 500 Jahre. Um der Kritik zu begegnen, dass diese Schwankungen der Stomata-Häufigkeit auf lokale Umweltveränderungen oder methodische Unzulänglichkeiten zurückzuführen sind, wurden mehrere Aufzeichnungen der Stomata-Häufigkeit für drei klimatische Schlüsselperioden während des Holozäns verglichen, nämlich die präboreale Oszillation, die 8,2 kyr Abkühlung und die Kleine Eiszeit. Die hochgradig vergleichbaren Fluktuationen in den paläoatmosphärischen CO₂-Aufzeichnungen, die von verschiedenen Kontinenten und Pflanzenarten (sommergrüne Angiospermen sowie Nadelbäume) unter Verwendung unterschiedlicher Kalibrierungsansätze gewonnen wurden, sind ein starker Beweis für die Integrität der blattbasierten CO₂-Quantifizierung.

References

Ahn, J., E. J. Brook, L. Mitchell, J. Rosen, J. R. McConnell, K. Taylor, D. Etheridge, and M. Rubino (2012), Atmospheric CO₂ over the last 1000 years: A high-resolution record from the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) Divide ice core, *Global Biogeochem. Cycles*, 26, GB2027, doi:10.1029/2011GB004247. [LINK](#)

Bereiter, Bernhard. Sarah Eggleston, Jochen Schmitt, Christoph Nehrbass-Ahles, Thomas F. Stocker, Hubertus Fischer, Sepp Kipfstuhl and Jerome Chappellaz. 2015. Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present. *Geophysical Research Letters*. . doi: 10.1002/2014GL061957. [LINK](#)

Bereiter et al. (2014), Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1002/2014GL061957. [Data](#)

Lüthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer, K. Kawamura, and T. F. Stocker. 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature* 453(7193):379-382, doi:

10.1038/nature06949. [LINK](#)

MacFarling Meure, C., D. Etheridge, C. Trudinger, P. Steele, R. Langenfelds, T. van Ommen, A. Smith, and J. Elkins. 2006. The Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O Ice Core Records Extended to 2000 years BP. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, No. 14, L14810 10.1029/2006GL026152. [LINK Data](#)

McElwain et al., 2001. Stomatal evidence for a decline in atmospheric CO₂ concentration during the Younger Dryas stadial: a comparison with Antarctic ice core records. *J. Quaternary Sci.*, Vol. 17 pp. 21–29. ISSN 0267-8179. [LINK](#)

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis J., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V., Lorius C.,

Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M., 1999, Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica, *Nature*, 399, pp.429-436. [LINK](#)

Petit, J.R., et al., 2001, Vostok Ice Core Data for 420,000 Years, IGBP PAGES/World Data Center

for Paleoclimatology Data Contribution Series #2001-076. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA. [LINK](#)

Wagner F, et al., 1999. Century-scale shifts in Early Holocene CO₂ concentration. *Science* 284:1971–1973.

Wagner F, Kouwenberg LLR, van Hoof TB, Visscher H, 2004. Reproducibility of Holocene atmospheric CO₂ records based on stomatal frequency. *Quat Sci Rev* 23:1947–1954. [LINK](#)

Weitere Lektüre

Fischer, H. A Short Primer on Ice Core Science. Climate and Environmental Physics, Physics Institute, University of Bern. [LINK](#)

[Featured Image Source](#)

Link:

<https://wattsupwiththat.com/2017/03/28/breaking-hockey-sticks-antarctic-ice-core-edition/>

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE