

Die CO₂-Verschiebung: Eiszeit zu Gaszeit



Der CO₂-Hockeyschläger

Der CO₂-Hockeyschläger ist eine bekannte Grafik. Abbildung 1 zeigt CO₂-Daten aus Eiskernblasen, CO₂-Daten aus dem Firn sowie atmosphärische, instrumentelle CO₂-Messungen von Cape Grim. Atmosphärische Daten sind nur für etwa die letzten 150 Jahre verfügbar. Daher werden Firn- und Eiskerndaten verwendet, um den CO₂-Datensatz weiter in die Vergangenheit zu verlängern. Hochakkumulierte Eisdaten wie DE08 reichen häufig nicht so weit in die Vergangenheit zurück und decken nicht einmal die Kleine Eiszeit (LIA) ab. Es ist erstaunlich, wie sich all die sehr unterschiedlichen CO₂-Datensätze bis auf wenige Ausnahmen recht gut überschneiden.

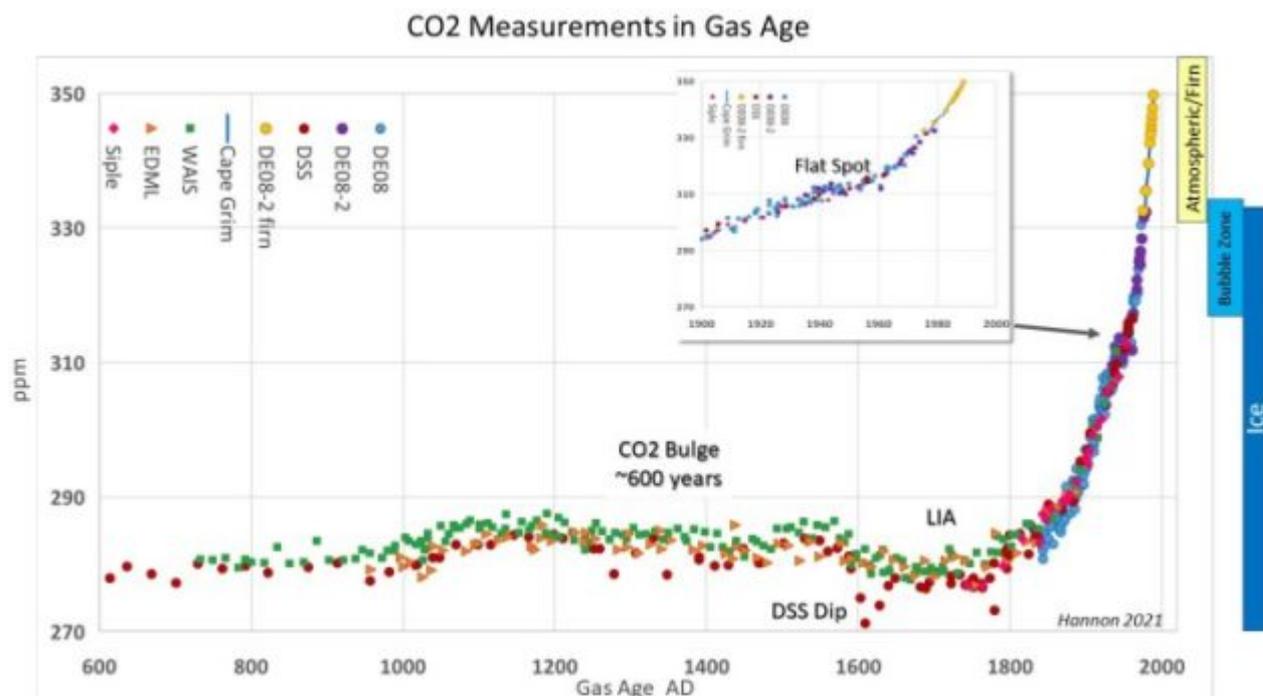


Abbildung 1: Auf das Gasalter korrigierte CO₂-Konzentrationen. Inset ist ein Blow-up zwischen 1900-2020 n. Chr., das den CO₂-Flachpunkt zeigt. Kästen markieren verschiedene Datenmedien und die ungefähre Lage der Eisblasenzonen. Die CO₂-Daten für Law Dome (DE08, DSS) stammen aus Rubino 2019; WAIS stammt aus Bauska 2015; Siple stammt aus Neftel 1994; und EDML stammt aus Siegenthaler, 2005.

Abgesehen von dem auffälligen Hockeyschläger gibt es noch einige andere bemerkenswerte Beobachtungen. Es gibt eine größere Streuung in den CO₂-Messungen von 1900 und älter zwischen den verschiedenen Eiskernaufzeichnungen. Ein Grund für die größere Streuung ist, dass die WAIS-CO₂-Daten systematisch 3-4 ppm höher sind als die Law-Dome-Eiskern-CO₂-Daten (Ahn, 2012). Wissenschaftler können diese Abweichung nicht erklären und subtrahieren häufig einfach 4 ppm von diesem Datensatz (Bereiter, 2014).

Ein CO₂-Flachpunkt und eine Stabilisierung von 310-312 ppm von 1940-1960 ist in den Law-Dome-Daten erkennbar (MacFarling, 2006). Die Glättung aufgrund der Gasdiffusion im Firn und des Einschlusses in Blasen reduziert die CO₂-Variationen, so dass die tatsächliche atmosphärische Variation wahrscheinlich größer ist als die Aufzeichnung des Law Dome-Eiskerns. Leider endete die CO₂-Glättung kurz bevor die atmosphärischen Aufzeichnungen am Mauna Loa begannen.

Eine CO₂-Ausbuchtung tritt in allen Eiskernaufzeichnungen von etwa 1000 n. Chr. bis 1600 n. Chr. auf und ist über 600 Jahre lang. Auch dieser CO₂-Anstieg hatte wahrscheinlich eine größere atmosphärische Signatur, als in den Eisbohrkernen erhalten ist. Der CO₂-Buckel endet mit dem Beginn der LIA um 1600 n. Chr., wo CO₂ in allen Eiskernaufzeichnungen abnimmt. Ein einzigartiger CO₂-Einbruch in den Law Dome DSS-Daten tritt um 1610 n. Chr. nahe dem Beginn der LIA auf und könnte auf die höhere Auflösung zurückzuführen sein (Rubino, 2019). Diese Senke ist in keinem anderen Eisdatensatz zu finden und trägt zur Streuung der CO₂-Daten bei. DSS hat auch andere CO₂-Tiefpunkte um 1780 n. Chr. nahe dem Ende der LIA und um 1278 und 1350 n. Chr. in der Mitte der CO₂-Ausbuchtung. Rubino weist darauf hin, dass das Verständnis dieser vom Eis aufgezeichneten Amplitudenschwankungen und der tatsächlichen Größe der ursprünglichen atmosphärischen Signaturen vor der Firniglättung ein entscheidendes Teil des CO₂-Puzzles ist.

Die CO₂-Verschiebung

Wie in meinem früheren WUWT-Beitrag [hier](#) besprochen, werden atmosphärische Gase während des Firnübergangs zu Eis und Blaseneinschluss modifiziert. Es gibt zwei wesentliche Modifikationen, die von der Schneeakkumulationsrate und der Temperatur abhängig sind. Erstens wird die CO₂-Variabilität aufgrund der atmosphärischen Durchmischung und Diffusion mit den CO₂-Konzentrationen im Firn geglättet. Zweitens wird angenommen, dass das Gas jünger als das Alter des Eises ist, wenn es schließlich in den Blasen eingeschlossen wird. (Battle, 2011; Trudinger, 2002, Blunier, 2000). Sobald das Gas in den Blasen eingeschlossen ist, wird angenommen, dass es mit dem Eis altert. Dieser Altersunterschied wird als Eis-Gas-Altersdelta bezeichnet. Das Delta reicht von etwa 30 Jahren im Law Dome bis zu 835 Jahren im EDML-Eiskern mit geringer Akkumulation. Sehr niedrig akkumulierende Standorte wie Dome C und Vostok haben ein großes Delta von Tausenden von Jahren.

Abbildung 2 zeigt die CO₂-Messungen aus dem tatsächlichen Alter des Eises, in dem es eingeschlossen ist, für fünf Eiskerne in der Antarktis und vor den Anpassungen durch die Anwendung von Eis-Gas-Alter-Deltas, wie in Abbildung 1 gezeigt. Atmosphärische Daten von Cape Grim und Firndaten sind zum Vergleich in der Grafik dargestellt. Die Deltadifferenz in Jahren zwischen dem jüngeren

Gasalter und dem älteren Eisalter sind vermerkt. Die Spitze des Eises, die ungefähr der Basis der Blasenzone entspricht, ist ebenfalls dargestellt. Dieser Plot ist ein Profil, das in der veröffentlichten Literatur selten zu finden ist oder diskutiert wird.

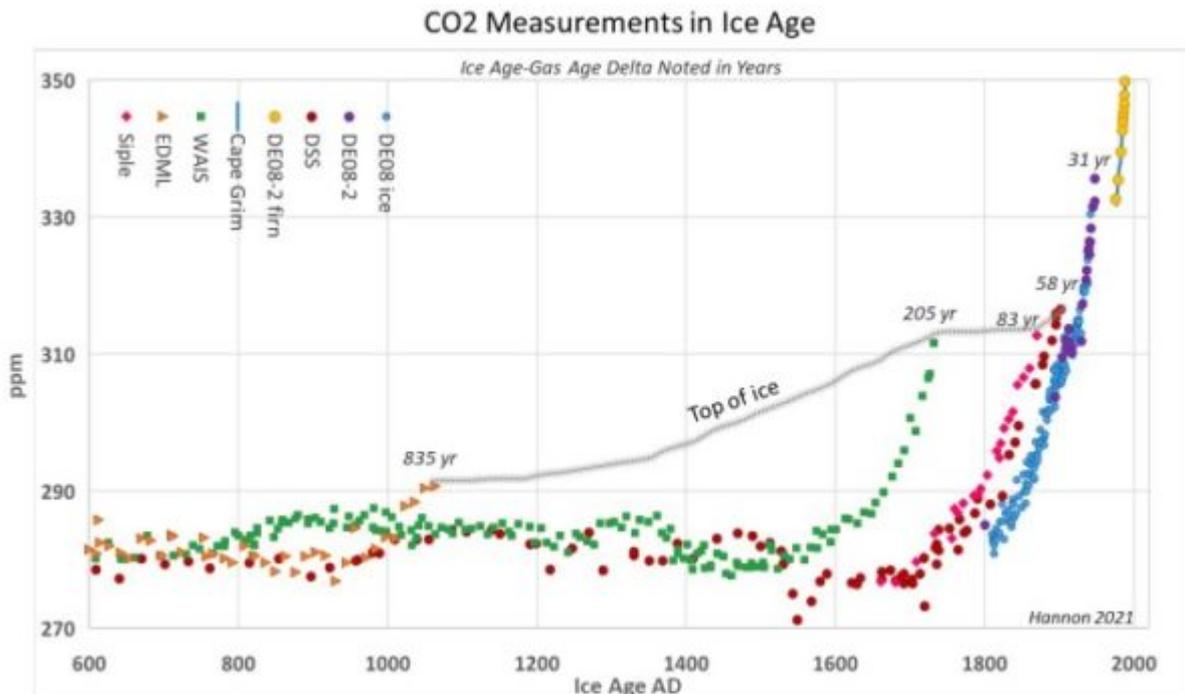


Abbildung 2: CO₂-Konzentrationen in der Eiszeit. Die Zahlen zeigen die Eiszeitdifferenz in Jahren. Die gestrichelte Linie ist die Spitze des Eises und die ungefähre Position der Basis der Blasenzone. Die Referenzen der CO₂-Daten sind in Abbildung 1 vermerkt.

Abbildung 2 führt zu der Frage, wie das Delta zwischen Eis- und Gasalter berechnet wird. Wenn die Gasmessungen in Eis oder Firn mit den Instrumentaldaten übereinstimmen, wird es einfach auf das Alter der Instrumentaldaten verschoben. Zum Beispiel werden die Eisgasdaten von Law Dome DE08 einheitlich um 31 Jahre verschoben, um mit den instrumentellen atmosphärischen Daten übereinzustimmen. Verschiedene andere Methoden werden verwendet, um das Delta und die daraus resultierende einheitliche Verschiebung zu schätzen. Firnmodelle können das Eisgas-Altersdelta für Eiskerne unter Verwendung von Dichte- und Temperaturdaten berechnen und werden durch die Verwendung von Stickstoff-15-Daten, einem Proxy für die Firndicke, eingeschränkt (Raynaud, 2005). Ein anderer Ansatz verwendet Eistiefen im Kern, die zeitgleich mit Eiskernen sind, bei denen die Gasalter gut eingegrenzt sind (Bender, 2005). DSS und Siple werden um 58 bzw. 83 Jahre verschoben, um mit den DE08-Daten übereinzustimmen. Nachdem alle Verschiebungen vorgenommen wurden, erscheint ein großer Hockeyschläger steigender CO₂-Konzentrationen um 1900 n. Chr., wie in Abbildung 1 dargestellt.

Die CO₂-„Verschiebungsmethode“ unter Verwendung der Siple-Daten wurde insbesondere von Jaworowski, 2004, hervorgehoben. Er wies darauf hin, dass im Jahr 1890 n. Chr. im Siple-Eiskern hohe CO₂-Konzentrationen von 328 ppm auftraten, die nicht mit der interpretierten CO₂-Basislinie übereinstimmen. Die gesamten Siple-CO₂-Daten wurden einfach um 83 Jahre verschoben, um mit

den modernen instrumentellen CO₂-Messungen am Mauna Loa von 1973 übereinzustimmen. Diese einfache Verschiebungsmethode ist nach wie vor eine akzeptierte Technik zur „Korrektur“ des jüngeren Gasalters in Eiskernen.

Das Ausmaß der Altersverschiebung ist interpretierbar, und Wissenschaftler verwenden verschiedene Methoden, die zu unterschiedlichen Verschiebungen für denselben Datensatz führen. Eisgasalter-Deltas haben Unsicherheiten von 10-15% (Seigenthaler, 2005). Warum ist dies also wichtig? Die Temperaturen aus der Wasser-Isotopenzusammensetzung des Eises sind eiszeitlich. Daher werden die Temperaturen immer im gleichen Alter wie das Eis dargestellt. Die Gasdaten hingegen werden vom Alter des Eises auf ein interpretiertes Gasalter korrigiert. Jede Auswertung von Lead-Lag-Beziehungen sollte die 10-15%ige Unsicherheit berücksichtigen, die mit der Berechnung der CO₂-Eis-Gas-Alter-Deltas verbunden ist.

Die Erhaltung des CO₂-Hocleyschlägers in Eis

Wenn die CO₂-Verschiebung oder das Altersdelta entfernt wird, wie in Abbildung 2 gezeigt, dann wird die CO₂-Variabilitätsunterdrückung mit niedrigeren Akkumulationsstellen leicht erkennbar. Mit Ausnahme von DE08 zeigen die Eiskernaufzeichnungen unterhalb der Blasenzone, dass die höchste Aufzeichnung von CO₂ nur 312-316 ppm beträgt, was fast 100 ppm unter dem aktuellen atmosphärischen Wert von 410 ppm liegt (Abbildung 3a). Es ist interessant festzustellen, dass diese Messwerte von 312-316 ppm mit dem DE08-Flachpunkt vergleichbar sind.

Viele Autoren haben eine Gasglättung in der Firnschicht aufgrund von vertikaler Gasdiffusion und allmählicher Blasenschließung beim Übergang von Firn zu Eis dokumentiert (Trudinger, 2002; Spahni, 2003; MacFarling, 2006; Joos und Spahni, 2008; Ahn, 2012; Fourteau, 2019; Rubino, 2019). Um Kerne von Standorten mit unterschiedlicher Akkumulationsrate zu kompensieren, wird eine Gasaltersverteilungsbreite oder Glättung modelliert. Zum Beispiel haben Kerne mit hoher Akkumulation wie Law Dome ein durchschnittliches Gasalter von 10-15 Jahren, WAIS ein durchschnittliches Gasalter von etwa 30 Jahren und DML von 65 Jahren. Standorte mit geringer Akkumulation wie Dome C und Vostok zeigen, dass das Gas über Hunderte von Jahren gemittelt oder geglättet ist. Das bedeutet, dass ein Glättungsfaktor auf atmosphärische Gasmessungen angewendet werden muss, wenn man sie mit verschiedenen Eiskernen vergleicht. Die meisten historischen CO₂-Diagramme spleißen jedoch einfach atmosphärisches und Firn-CO₂ auf Eis-CO₂-Daten auf, ohne eine Glättung anzuwenden, wie in Abbildung 1 gezeigt.

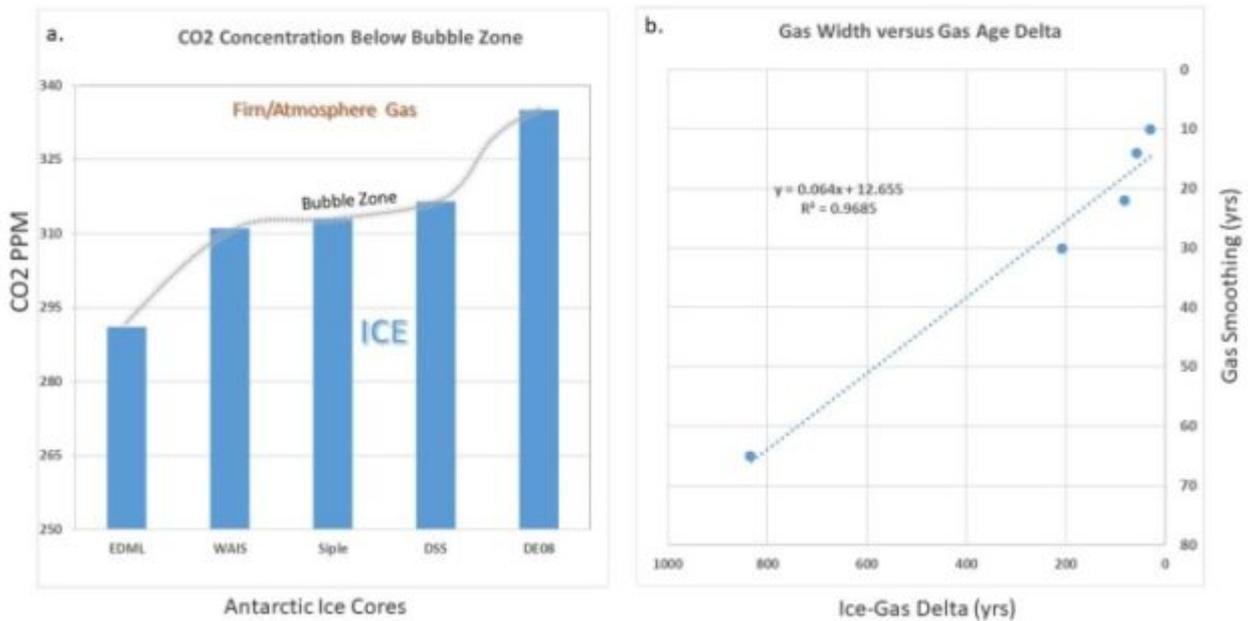


Abbildung 3: a) Anfängliche CO₂-Konzentration in jedem Eiskern unterhalb der Blasenzone. b) Diagramm, das die Beziehung zwischen Eis-Gas-Alter-Delta und Gasglättung in Jahren zeigt. Daten aus Ahn, 2012; Trudinger, 2002, und Seigenthaler, 2005.

Eiskerne mit geringer Akkumulation, die größere Verschiebungen und größere Eis-Gas-Alter-Deltas erfahren, bewahren auch eine geringere CO₂-Variabilität und eine höhere Glättung. Die Beziehung zwischen der Verschiebung des Eisgasalters und der Glättung der Gasamplitude ist in Abbildung 3b dargestellt.

Beobachtungen

Beim Vergleich des schnellen Anstiegs des atmosphärischen CO₂ in diesem Jahrhundert mit Daten aus vergangenen Eiskernen werden viele Variablen und Datenannahmen verwendet. CO₂-Messungen aus sehr unterschiedlichen Datensätzen werden häufig miteinander verknüpft; atmosphärische, Firn- und Eiskerne. Atmosphärisches CO₂-Gas wird im Firn durch Diffusion und allmählichen Blaseneinschluss verändert und kann nicht direkt mit CO₂-Daten in Eiskernen unterhalb der Blasenzone verglichen werden. Die übliche Methode, CO₂-Eiskernaltersmessungen einfach zu verschieben, kombiniert mit der Nichtanwendung der entsprechenden atmosphärischen Abschwächung, ergibt den verstärkten CO₂-Hockeyschläger.

Acknowledgements: Special thanks to Donald Ince and Andy May for reviewing and editing this article.

Download the **bibliography** [here](#).

Link:

<https://wattsupwiththat.com/2021/05/02/the-co2-shift-ice-age-to-gas-age/>

Übersetzt von Chris Frey EIKE