



---

## **800'000 Jahre Klimageschichte der Antarktis: Eine Herausforderung für die Klimamodellierung**

**Th. Stocker**

### **1 Zusammenfassung**

Eisbohrkerne aus Grönland und der Antarktis sind ein einzigartiges Klimaarchiv, aus welchem unter anderem Temperaturänderungen und die Konzentrationen der wichtigsten Treibhausgase rekonstruiert werden können. Die bisher längste Klimageschichte stammt vom neuesten Kern von Dome Concordia und deckt die letzten 900'000 Jahre ab, wovon bereits 740'000 Jahre analysiert sind. In Grönland wurde die Klimageschichte bis 125'000 Jahre vor heute rekonstruiert. Die letzte Eiszeit ist durch eine Serie von abrupten Erwärmungen charakterisiert, die mit Signalen in den Antarktischen Kernen korrelieren. Daraus lassen sich Aussagen über die globale Dynamik dieser Ereignisse gewinnen.

### **2 Einleitung**

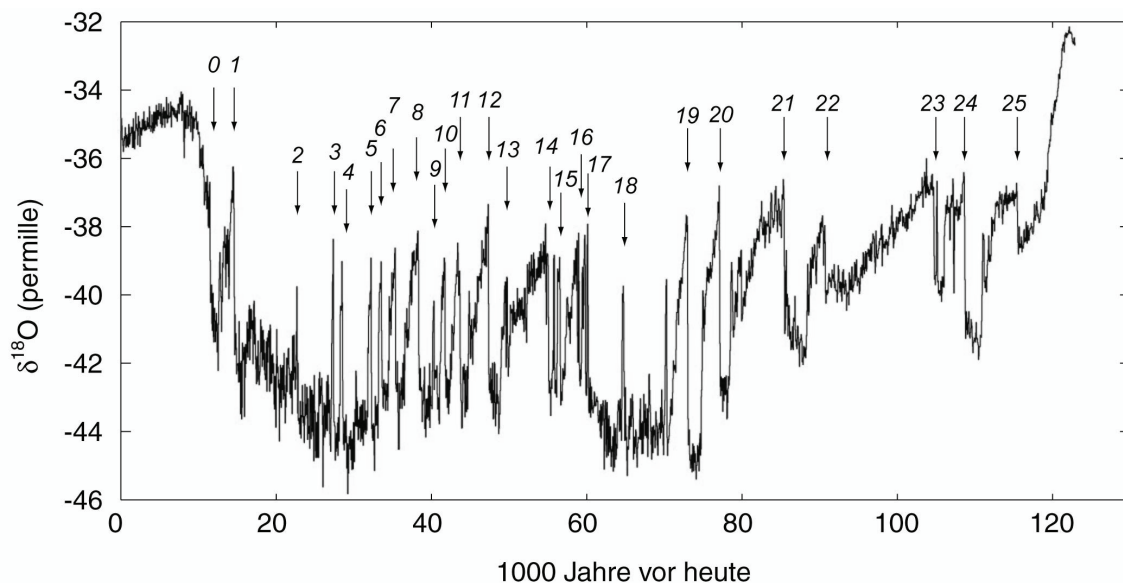
Die Rekonstruktion vergangener Klimaänderungen ist eine notwendige Voraussetzung für die glaubwürdige Abschätzung der globalen Auswirkungen des Anstiegs der Konzentration der wichtigsten Treibhausgase in der Atmosphäre seit 1750. Dabei steht nicht nur die Bestimmung der so genannten Klimasensitivität, das heisst die mittlere globale Erwärmung bei einer Verdoppelung der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration, sondern auch eine Abschätzung, ob das Klimasystem allenfalls Schwellenwerte aufweist, bei deren Überschreitung irreversible Klimaänderungen eintreten könnten.

Eine detaillierte Klimarekonstruktion erfordert zuverlässige und stabile Aufzeichnungen über Jahrhunderte. Während in der Natur sämtliche Systeme auf Veränderungen von Klimavariablen reagieren, gibt es nur wenige, die diese Signale in zeitlicher Abfolge auch aufzeichnen. Grundsätzlich wird zwischen physikalisch-chemischen und biologischen Archiven unterschieden. Mit wenigen Ausnahmen zeichnen diese Archive eine komplexe Kombination von Umwelteinflüssen auf, deren korrekte Entschlüsselung eine der grössten Herausforderungen der Klimawissenschaften darstellt. Die in den verschiedenen Archiven gemessenen Grössen stellen also nur so genannte Proxydaten dar.

In einigen ausgewählten Klimaarchiven liegt aber die Information nahezu unverfälscht vor, und die Klimaänderung in der Vergangenheit kann direkt gemessen werden. Zum Beispiel gelingt es, am Ozeanboden Profile des Salzgehalts des Porenwassers in verschiedenen Tiefen des Sediments zu messen. Da der Salzgehalt des Ozeans vor ca. 10'000 Jahren wegen dem Abschmelzen der grossen Landeis Massen und der daraus resultierenden Erhöhung des Meeresspiegels um ca. 3% abgenommen hat, ist dieses Signal in das durchlässige Sedimentmaterial langsam hinein diffundiert. Durch die Messung eines solchen Profils kann somit direkt auf den Salzgehalt der Eiszeit geschlossen werden (Adkins et al. 2002). Genauso kann das Eindringen der Erwärmung zum Ende der letzten Eiszeit durch hochpräzise Temperaturmessungen in einem Bohrloch im grönländischen Eisschild bestimmt werden (Dahl-Jensen et al. 1998).

In polaren Eisbohrkernen gibt es zwei weitere Methoden zur direkten Rekonstruktion von Klimavariablen. Die obersten 80 bis 100 Meter eines polaren Eisschildes bestehen aus porösem Firn, durch den Luftmoleküle zirkulieren können. Dabei stellt sich ein nahezu perfektes diffusives Gleichgewicht ein. An der Firnbasis werden durch den hohen Druck des darüberliegenden Schnees die Zwischenräume immer kleiner, bis einzelne Blasen ihre Verbindung zum Firn verlieren: Einzelne Gasblasen werden abgeschnitten und enthalten nun eine kleine Probe der Luftzusammensetzung, die jünger ist als das umgebende Eis. In grönländischem Eis beträgt der Altersunterschied ca. 200 Jahre, in der Antarktis wegen dem viel geringeren Niederschlag sogar 3000 - 5000 Jahre. Messungen der Luftzusammensetzung dieser Gasblasen haben den Beweis erbracht, dass die Konzentrationen der beiden wichtigsten Treibhausgase, Kohlendioxid und Methan, heute um über 30%, bzw. über 250% höher sind als je zuvor in den letzten 650'000 Jahren.

In der Firnsäule tritt jedoch auch eine Fraktionierung von Molekülen unterschiedlicher Masse auf. Dies ist eine Folge der statistischen Thermodynamik: Die Teilchendichte ist proportional zum Boltzmannfaktor  $\exp(-\Delta E/kT)$ , wobei  $\Delta E = mg\Delta z + m\alpha\Delta T$  die Änderung der potentiellen und der inneren Energie bezeichnen. Falls  $m + \Delta m$  die Masse der schwereren Moleküle darstellt, ist das Verhältnis der Teilchenanzahlen  $N_{m+\Delta m}/N_m = [\exp(-(g\Delta z + \alpha\Delta T)/kT)]^{\Delta m}$ . Je tiefer die Firnsäule und je grösser der Temperaturkontrast in der Firnsäule, desto grösser ist die massenabhängige Fraktionierung. Die Gaszusammensetzung wird dann an der Firnbasis beim Blasenabschluss konserviert, und kann an polaren Eisbohrkernen gemessen werden. Mit mehreren Isotopenpaaren der Luft ( $^{28}\text{N}_2/^{29}\text{N}_2$  oder  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ ) werden nun die verschiedenen Informationen separiert. Insbesondere kann  $\Delta T$ , der Temperaturkontrast zwischen Firnoberfläche und Firnbasis, bestimmt werden. Da Wärme im Firn viel langsamer als Gase diffundiert, zeichnet die Fraktionierung von Gasisotopen deshalb abrupte Temperaturschwankungen der Vergangenheit auf. Diese Methode wurde bereits mehrfach in Grönland angewendet (Lang et al. 1999; Leuenberger et al. 1999; Severinghaus und Brook 1999; Huber et al. 2005), und es konnte gezeigt werden, dass die bereits lange bekannten Erwärmungen, die sogenannten Dansgaard/Oeschger Ereignisse (Dansgaard et al. 1984; Oeschger et al. 1984; Dansgaard et al. 1993), Temperaturänderungen von ca. 8 bis 16°C in Grönland zu Folge hatten.



**Abb. 1** Temperaturrekonstruktion anhand stabiler Isotope am neuesten Eisbohrkern von Grönland (NorthGRIP). 25 abrupte Erwärmungen (Dansgaard/Oeschger Ereignisse) sind während der letzten Eiszeit aufgetreten (NorthGRIP Members 2004)

Diese Signale wurden ursprünglich in den Messungen der Isotopen-Zusammensetzung des Eises, ebenfalls ein Mass für die Temperatur, entdeckt (Dansgaard et al. 1984). Mittlerweile wurden 25 Dansgaard-Oeschger Ereignisse gefunden, wie die neueste Temperatur-Rekonstruktion an einem Eisbohrkern aus Grönland ersichtlich ist, der im Rahmen des NorthGRIP Projektes gebohrt wurde (Abb. 1).

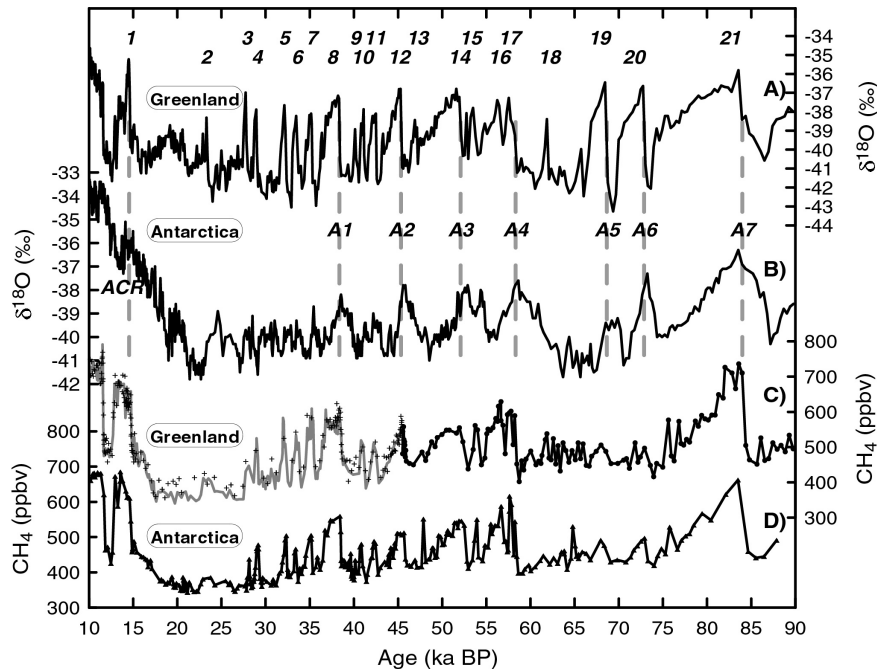
Anhand eines aktuellen Beispiels der Berner Paläoklimaforschung zeigen wir auf, wie die Kombination von Modellen und Klimadaten aus Eisbohrkernen zentrale Fragen über die Dynamik im System Erde, sowie der Ursache von Klimaänderungen beantworten kann.

### **3 Die thermische bipolare Klimaschaukel als Modell für abrupte Klimaschwankungen**

Die präzise Bestimmung der Gaszusammensetzung in Eisbohrkernen von Grönland und der Antarktis ist von zentraler Bedeutung für das Verständnis abrupter Klimaschwankungen. Jedes DO-Ereignis ist durch ein Maximum in  $\text{CH}_4$  markiert, das einige 10 bis 100 Jahre andauert, und das in Eiskernen nachgewiesen werden kann. Da sich  $\text{CH}_4$  Änderungen in der Atmosphäre global schnell ausbreiten, stellen diese Maxima Zeitmarken im Eis dar, anhand derer die Eisbohrkerne synchronisiert werden können. Blunier et al. (1998) haben diese Methode erstmals angewendet und gezeigt, dass einige der längsten DO-Ereignisse im Grönlandeis mit Warmphasen in der Antarktis zeitlich zusammenfallen.

Diese wichtige Beobachtung hat zu verschiedenen Spekulationen geführt, durch welche Mechanismen Grönland und die Antarktis dynamisch miteinander verbunden sind. Die langsame Erwärmung im Süden beginnt ca. 1500 Jahre vor der abrupten Erwärmung in Grönland, was als Hinweis gedeutet wurde, dass Klimaänderungen vom Süden ausgelöst würden (Blunier et al. 1998). Andererseits erfolgte gerade zum Zeitpunkt der Erwärmung in Grönland die Umkehr im Erwärmungstrend im Süden, was eher die Dominanz des Norden unterstreicht. Ohne die Ursache der Schwankungen zu erklären, wurde bereits 1992 gezeigt, dass die Kopplung zwischen den Hemisphären durch die thermohaline Zirkulation des Atlantischen Ozeans zustande kommen könnte (Crowley 1992; Stocker et al. 1992a). Diese Zirkulation transportiert etwa  $10^{15}$  Watt Wärme im Atlantik nordwärts (Ganachaud and Wunsch 2000), und trägt somit wesentlich zu den milden klimatischen Bedingungen Europas bei. Der

Wärmetransport erfolgt im Atlantik über den Äquator hinweg, das heisst, die Südhemisphäre wird zugunsten des Nordens gekühlt. Ein Abstellen dieser Zirkulation führt im Norden somit zu einer Abkühlung, im Süd-Atlantik hingegen zu einer Erwärmung (Abb. 3, links). Damit war die Metapher der "bipolar seesaw" (bipolare Klimaschaukel) geprägt (Broecker 1998; Stocker, 1998).



**Abb. 2** Synchronisation der Temperatur-Rekonstruktionen aus Eisbohrkernen von Grönland und der Antarktis anhand von hochauflösenden  $\text{CH}_4$  Messungen, deren Variationen als globale Zeitmarken dienen (Blunier and Brook 2001)

Die *bipolar seesaw* sagt voraus, dass Nord und Süd sich zeitlich identisch, jedoch mit unterschiedlichem Vorzeichen ändern: Wird es im Norden warm, so kühlt sich der Süden ab. Diese perfekte Synchronisation von Klima-Schwankungen wird jedoch nicht beobachtet. Temperaturänderungen in der Antarktis sind nicht abrupt wie in Grönland, sondern entwickeln sich über mehrere Jahrhunderte. Die einfache Klimaschaukel scheidet somit als Erklärung.

Eine offensichtliche Erweiterung ergibt sich aus der Erkenntnis, dass der südliche Ozean ein grosses Wärmereservoir darstellt (Stocker and Johnsen 2003). Ein abrupter Unterbruch des meridionalen Wärmetransport aus dem südlichen Ozean durch ein Abstellen der Zirkulation verursacht somit eine Erwärmung, deren zeitliche Entwicklung im wesentlichen durch die Wärmekapazität des südlichen Ozeans bestimmt wird. Wir betrachten also schematisch eine Klimaschaukel, die thermisch an den südlichen Ozean

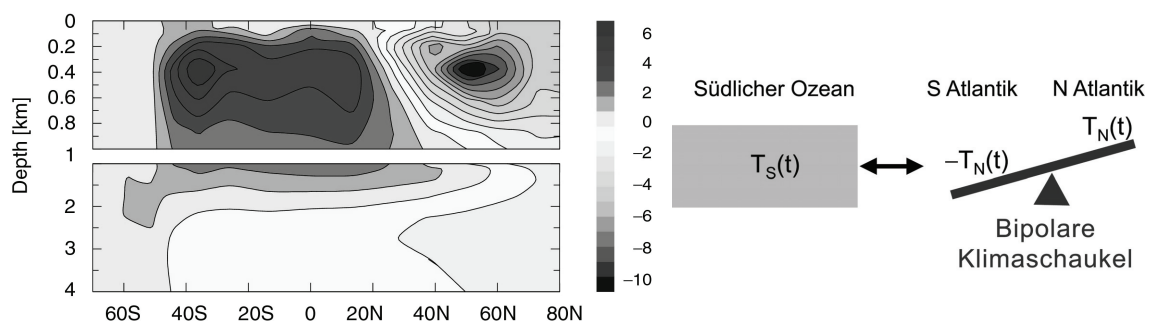
gekoppelt ist (Abb. 3, rechts). Dies kann als einfaches Energiebilanzmodell wie folgt formuliert werden

$$\frac{dT_S(t)}{dt} = \frac{1}{\tau}(-T_N(t) - T_S(t)). \quad (1)$$

Die Temperaturanomalie des Wärmereservoirs wird mit  $T_S$  bezeichnet,  $\tau$  ist eine charakteristische Zeitskala, und  $T_N$  ist die zeitlich veränderliche Temperaturanomalie im Norden, d.h. am nördlichen Ende der *bipolar seesaw*. Somit ist  $-T_N$  die entsprechende Temperaturanomalie des südlichen Endes der Schaukel, und der Wärmefluss wurde proportional zur Temperaturdifferenz angenommen. Die Differentialgleichung (1) kann durch eine Laplace-Transformation nach  $T_S$  aufgelöst werden

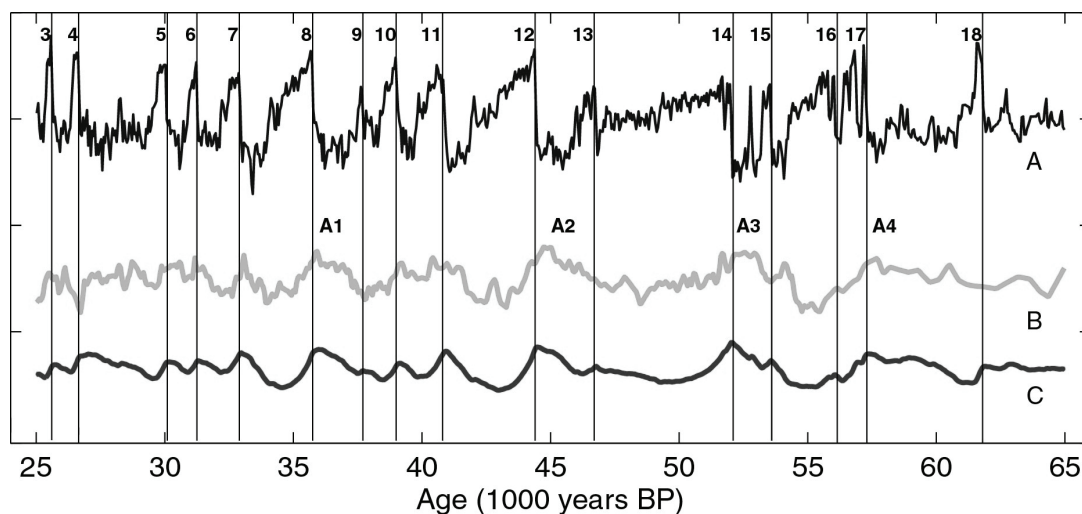
$$T_S(t) = -\frac{1}{\tau} \int_0^t T_N(t-t') e^{-t'/\tau} dt' + T_S(0) e^{-t/\tau}. \quad (2)$$

Gleichung (2) besagt, dass die südliche Temperaturanomalie eine Integration der nördlichen Temperaturanomalie mit beschränktem "Erinnerungsvermögen" darstellt. Bei bekannter nördlicher Temperatur können wir somit eine Voraussage über die Änderungen der südlichen Temperatur machen. In diesem Sinne ist (1) ein Klimamodell, jedoch ein extrem vereinfachtes. Es ist erstaunlich, dass mit diesem einfachen Ansatz über 60% der gemeinsamen Variabilität der Temperaturschwankungen in Grönland und der Antarktis während der letzten Eiszeit erklärt werden können.



**Abb. 3** Links: Änderung der Temperatur in einem meridionalen Schnitt durch den Atlantischen Ozean, wenn die thermohaline Zirkulation abstellt. Die Simulationen wurden mit dem Bern2.5D Modell ausgeführt (Stocker et al. 1992b). Eine Abkühlung im Norden wird durch eine Erwärmung im Süden thermisch kompensiert. Rechts: Schematische Darstellung der thermisch gekoppelten Klimaschaukel

Das seesaw Modell macht aber auch eine Voraussage, die mit den nun neu erbohrten Eiskernen der Antarktis überprüft werden kann. Gemäss (2) wird jede abrupte Temperaturänderung in  $T_N$  eine zeitlich integrierte Signatur in  $T_S$  hinterlassen, deren Amplitude von der Verweildauer von  $T_N$  auf einer bestimmten Temperatur abhängt. Jedes Dansgaard/Oeschger Ereignis sollte also in den Antarktischen Eisbohrkernen sichtbar sein. Bisher sind jedoch nur sieben solcher Ereignisse (A1, A2, ... A7, siehe Abb. 2) eindeutig identifiziert worden. Die Voraussage des seesaw Modells ist in Abb. 4 dargestellt.



**Abb. 4** Hochpass gefilterte Zeitreihen der stabilen Isotopenkonzentration an den Eisbohrkernen von GRIP (Grönland, Kurve A) und Byrd Station (Antarktis, Kurve B) und simulierte Temperaturkurve aufgrund von Gl. (2) mit A als  $T_N(t)$ . Jedes Dansgaard/Oeschger Ereignis ist als Umkehr eines langsamen Erwärmungstrends in der Antarktis sichtbar (Kurve C)

#### 4 740'000 Jahre Klimageschichte aus der Antarktis und die Stabilität von Eiszeiten

Im Rahmen des europäischen Projekts EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) wurden während den letzten 8 Jahren zwei Eisbohrkerne aus unterschiedlichen Regionen der Antarktis erbohrt. An der Concordia Station wurde das Felsbett bis auf ca. 5 m am 21.12.2004 erreicht; an der zweiten Kohnen Station, die dem Atlantischen Ozean zugewandt ist, werden in der Feldsaison 2005/2006 die letzten 150 m Eis gewonnen. Die Details der Stationen sind in Tab. 1 zusammengefasst. Das Projekt ist eine Kooperation von 10 Nationen in Europa und wurde von der Europäischen Kommission in 3 Rahmenforschungsprogrammen unterstützt. Für die Logistik waren Frankreich, Italien und Deutschland verantwortlich. Die Abteilung für Klima- und

Umwelphysik der Universität Bern war seit Beginn von EPICA ein führender Partner. Unser Beitrag betraf sowohl Infrastruktur (Bohrturm, Bohrkopf und Bohrmesser) als auch eine ausgedehnte Messkampagne im Feld (Elektrische Leitfähigkeit, kontinuierliche Analyse chemischer Substanzen am Eis).

**Tab. 1** Stationsdaten der Antarktischen Tiefbohrungen im Rahmen des Projekts EPICA

	<b>Dome C</b>	<b>Dronning Maud Land</b>
Geographischer Name	Dome C	Dronning Maud Land
Stationsname	Concordia Station	Kohnen Station
Koordinaten	75° 06' S, 123° 21' E	75° 00' S, 0° 04' E
Höhe über Meer	3233 m	2892 m
Jahresmitteltemperatur	- 54.5°C	- 44.6°C
Mittlerer Niederschlag	2.5 cm/Jahr	6.4 cm/Jahr
Eisdicke	3309 ± 20 m	2750 ± 50 m
Bohrtiefe	3270.2 m (12/2004)	2565 m (3/2004)
geschätztes Eisalter	910'000 Jahre	180'000 Jahre

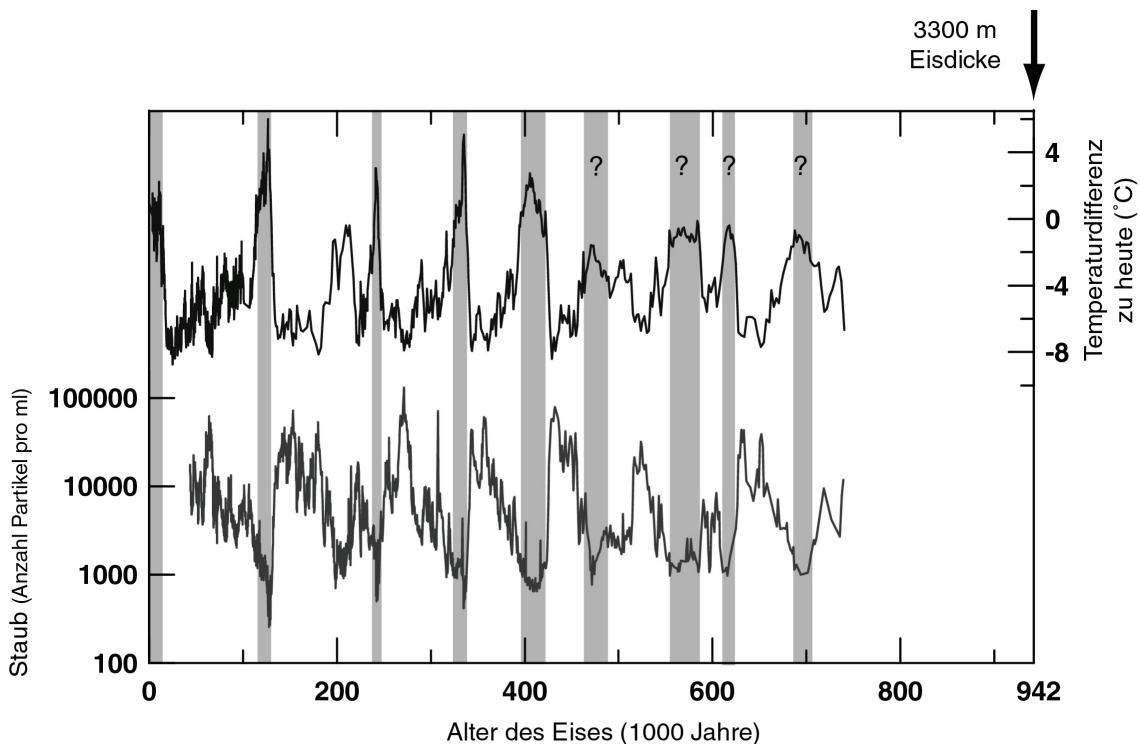
Mit dem Kern von Dome Concordia wird es zum ersten Mal möglich sein, die Klimageschichte über die letzten 400'000 Jahre, die bisher vom Eisbohrkern von Vostok Station abgedeckt war (Petit et al. 1999), signifikant zu verlängern. Dabei wird nun eine Klimaphase untersucht, die sich in der Struktur völlig von den letzten 400'000 Jahren unterscheidet (Abb. 5). Bisher hatte man vermutet, dass die Eiszeitzyklen der letzten 10<sup>6</sup> Jahre im wesentlichen durch den 100'000 Jahr Zyklus der Erdbahnelemente geprägt sei. Der neue Eisbohrkern vermittelt jedoch ein detaillierteres Bild über die Stabilität und den Charakter der grossen Eiszeiten.

Vor 400'000 Jahren vor heute waren die Eiszeiten wesentlich kürzer, während die Zwischeneiszeiten umso länger ausfielen. Die Temperaturrekonstruktionen weisen darauf hin, dass die Erwärmungen nur unvollständig waren: Vor 400'000 Jahren wurden die hohen Temperaturen während den Warmzeiten nie erreicht. Über den Grund dieses kühleren Klimas in der Antarktis, und wohl in weiten Teilen des Planeten kann im Moment nur spekuliert werden. Einerseits könnten die Treibhausgaskonzentrationen niedriger gewesen sein, was dann einem abgeschwächten natürlichen Treibhauseffekt entsprechen würde. Diese Messungen stehen in Bern kurz vor dem Abschluss. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass auf den Kontinenten der Nordhemisphäre noch Überreste von Eisschildern der vorangehenden Eiszeiten vorhanden waren, die durch den sehr effizienten



Eis-Albedo Effekt, der eine positive Rückkoppelung der Strahlungsbilanz darstellt, eine wesentliche Abkühlung bewirkten.

Aus Abb. 5 geht bereits deutlich hervor, dass während den 8 vollständigen Eiszeiten, die in diesem Eisbohrkern enthalten sind, Klimaschwankungen des Typs A1-A7 nach Abb. 2 ebenfalls vorhanden sind. Falls also unser "Klimamodell" der *thermal bipolar seesaw* (1) eine universelle Gültigkeit hat, dann können wir versuchen, die nördliche Temperatur via die Kenntnis von  $T_S$  zu rekonstruieren. Die Inversion von (1) wurde in einer neuen Arbeit verwendet, um eine Temperaturkurve von Grönland zu simulieren (Siddall et al. 2005). Das Modell liefert somit Resultate eines künstlichen Eisbohrkerns von Grönland zu einer Zeit, in welcher keine Kerne von Grönland vorliegen. Erste Vergleiche mit marinen Sedimenten und der Zeitreihe von  $CH_4$  aus dem Antarktischen Kern zeigen, dass tatsächlich eine gute Übereinstimmung vorliegt, und wir somit schliessen, dass die Dynamik von abrupten Klimaänderungen während den verschiedenen Eiszeiten ähnlich war.



**Abb. 5** Temperatur-Rekonstruktion anhand von stabilen Isotopen des Eises, und Staubkonzentration, gemessen am EPICA Eisbohrkern von Concordia Station (Antarktis) (EPICA Community Members 2004)

## 5 Schlussfolgerungen

In der heutigen Klimamodellierung wird leider allzu häufig versucht, bereits vorhandene Klimadaten möglichst genau nachzusimulieren, um die Güte eines Klimamodells zu demonstrieren. Spannender ist jedoch der Ansatz, mit Klimamodellen Voraussagen zu machen, die dann verifiziert oder falsifiziert werden. Wir haben gezeigt, dass mit einem sehr einfachen Konzeptmodell eine solche Voraussage betreffend abrupter Klimaänderungen gemacht werden kann. Mit Hilfe von hochauflösenden Daten aus Eisbohrkernen sollte es in nächster Zukunft möglich sein, diese Voraussagen nachzuprüfen, nämlich ob jedes Dansgaard/Oeschger Ereignis im Zusammenhang steht mit einer graduellen Erwärmung und nachfolgender Abkühlung im Süden. Falls dies zutrifft, wäre das eine eindruckliche Bestätigung der bipolaren Klimaschaukel.

Eisbohrkerne sind vor allem deshalb ein einzigartiges Klimaarchiv, weil sie erlauben, die Konzentrationen der wichtigsten Treibhausgase zu rekonstruieren. In wenigen Monaten wird zum ersten Mal eine Zeitreihe vorliegen, die die natürlichen Schwankungen von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> über die letzten 650'000 Jahre zeigt. Wir erwarten von diesen Analysen grundsätzlich neue Erkenntnisse über die Dynamik des Klimasystems und den globalen Kohlenstoffhaushalt. Diese sind dann mit Klimamodellen quantitativ zu verknüpfen, um einerseits zeitliche und geographische Lücken des Verständnisses zu schliessen, andererseits Voraussagen zu machen, die anhand realer Daten überprüft werden können.

## Referenzen

- Adkins, J.F., McIntyre, K., Schrag, D.P. (2002). The salinity, temperature, and  $\delta^{18}\text{O}$  of the glacial deep ocean. *Science* 298, 1769-1773.
- Blunier, T., Brook, E.J. (2001). Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period. *Science* 291, 109-112.
- Blunier, T., Chappellaz, J., Schwander, J., Dallenbach, A., Stauffer, B., Stocker, T.F., Raynaud, D., Jouzel, J., Clausen, H.B., Hammer, C.U., Johnsen, S.J. (1998). Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period. *Nature* 394, 739-743.
- Broecker, W.S. (1998). Paleocean circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw? *Paleoceanogr.* 13, 119-121.

- Crowley, T.J. (1992). North Atlantic deep water cools the southern hemisphere, *Paleoceanogr.* 7, 489-497.
- Dahl-Jensen, D., Mosegaard, K., Gundestrup, N., Clow, G.D., Johnsen, S.J., Hansen, A.W., Balling, N. (1998). Past temperatures directly from the Greenland ice sheet. *Science* 282, 268-271.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Hammer, C.U., Oeschger, H. (1984). North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. *Climate Processes and Climate Sensitivity* 288-298, J.E. Hansen, T. Takahashi, eds. American Geophysical Union, Washington.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdóttir, A.E., Jouzel, J., Bond, G. (1993). Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218-220.
- EPICA Community Members (2004). Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429, 623-628.
- Ganachaud, A., Wunsch, C. (2000). Improved estimates of global ocean circulation, heat transport and mixing from hydrographic data. *Nature* 408, 453-457.
- Huber, C., Leuenberger, M., Spahni, R., Flückiger, J., Schwander, J., Stocker, T.F., Johnsen, S., Landais, A., Jouzel, J. (2005). Isotope calibrated Greenland temperature record over Marine Isotope Stage 3 and its relation to CH<sub>4</sub>, *Earth Plan. Sci. Lett.*, submitted.
- Lang, C., Leuenberger, M., Schwander, J., Johnsen, S. (1999). 16°C rapid temperature variation in Central Greenland 70,000 years ago. *Science* 286, 934-937.
- Leuenberger, M., Lang, C., Schwander, J. (1999).  $\delta^{15}\text{N}$  measurement as a calibration tool for the paleothermometer and gas-ice age differences. A case study for the 8200 B.P. event on GRIP ice, *J. Geophys. Res.* 104, 22163-22170.
- NorthGRIP Members (2004). High-resolution climate record of the northern hemisphere back into the last interglacial period. *Nature* 431, 147-151.
- Oeschger, H., Beer, J., Siegenthaler, U., Stauffer, B., Dansgaard, W. Langway, C.C. (1984). Late glacial climate history from ice cores. *Climate Processes and Climate Sensitivity*, 299-306, J.E. Hansen, T. Takahashi, eds. American Geophysical Union, Washington.
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., 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, 429-436.

Severinghaus, J.P., Brook, E.J. (1999). Abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice. *Science* 286, 930-934.

Siddall, M., Stocker, T.F. Spahni, R. Blunier, T. (2005). Using a maximum simplicity paleoclimate model to simulate millennial variability during the last four glacial periods. *Quat. Sci. Rev.*, submitted.

Stocker, T.F. (1998). The seesaw effect. *Science* 282, 61-62.

Stocker, T.F., Johnsen, S.J. (2003). A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Paleoceanogr.* 18, 1087.

Stocker, T.F., Wright, D.G. Broecker, W.S. (1992a). The influence of high-latitude surface forcing on the global thermohaline circulation. *Paleoceanogr.* 7, 529-541.

Stocker, T.F., Wright, D.G., Mysak, L.A. (1992b). A zonally averaged, coupled ocean-atmosphere model for paleoclimate studies, *J. Clim.* 5, 773-797.

*Adresse des Autors:*

Prof. Dr. Thomas Stocker  
Klima- und Umweltphysik  
Physikalisches Institut Universität Bern  
Sidlerstrasse 5  
3012 Bern  
E-Mail: [stocker@climate.unibe.ch](mailto:stocker@climate.unibe.ch)

