

Polare Eisbohrkerne – Eckpfeiler der Klimarekonstruktion

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 800 000 Jahre ab. Der zweite Kern stammt von Dronning Maud Land und liefert zum ersten Mal eine detaillierte Aufzeichnung von Klimasignalen aus der dem Südatlantischen Ozean zugewandten Seite. In Eisbohrkernen von Grönland ist eine Serie von abrupten Erwärmungen gefunden worden, die nun mit Signalen in den Antarktischen Kernen korreliert werden können. Daraus lassen sich wichtige Aussagen über die globale Dynamik dieser Ereignisse gewinnen.

Die Rekonstruktion vergangener Klimaänderungen und ihrer regionaler Ausprägungen ist eine notwendige Voraussetzung für die glaubwürdige und umfassende Abschätzung der Auswirkungen des

Anstiegs der Konzentration der wichtigsten Treibhausgase in der Atmosphäre seit 1750 (vgl. IPCC 2007). Der Bestimmung der sogenannten Klimasensitivität, das heißt die mittlere globale Erwärmung bei einer Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration, kommt besondere Bedeutung zu. Obwohl von primär theoretischer Bedeutung, ist die Klimasensitivität ein wichtiges Maß für die erwarteten Änderungen im Klimasystem. Größen, die sich mit ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre linear verändern, können mit dieser Größe skaliert werden.

Die Forschung der letzten 20 Jahre hat jedoch gezeigt, dass das Klimasystem auf die Veränderungen von Einflussgrößen wie die Sonneneinstrahlung oder die Verteilung von Eisschilden nicht immer linear reagiert, sondern ein sehr dynamisches Verhalten aufweisen kann. Dies äußert sich beispielsweise in abrupten Klimaschwankungen der letzten Eiszeit, die in Eisbohrkernen von Grönland aufgezeichnet sind und unter dem Namen Dansgaard-Oeschger-Ereignisse bekannt geworden sind. Somit muss die Frage gestellt werden, ob auch das heutige Klimasystem 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 zuverlässig aufzeichnen. Grundsätzlich wird zwischen physikalisch-chemischen und biologischen Archiven unterschieden. Mit wenigen Ausnahmen registrieren diese Archive eine komplexe Kombination von Umwelteinflüssen, deren korrekte Entschlüsselung eine der größten Herausforderungen der Klimawissenschaften darstellt. Die meisten in den verschiedenen Archiven gemessenen Größen stellen also nur so genannte Proxydaten dar.

Direkte Klimainformation aus polarem Eis

In einigen wenigen Klimaarchiven liegt aber die Information nahezu unverfälscht vor, und die vergangenen Änderungen bestimmter klimarelevanter Parameter können direkt bestimmt werden. Zum Beispiel gelingt es, Profile des Salzgehalts des Porenwassers in verschiedenen Tiefen der Sedimentschicht am Ozeanboden zu messen. Da der Salzgehalt des Ozeans vor ca. 10 000 Jahren wegen des Abschmelzens der großen Landeismassen und der daraus resultierenden Erhöhung des Meeresspiegels um ca. 3 % abgenommen hat, ist dieses Signal langsam in das durchlässige Sedimentmaterial hinein diffundiert. Durch die Messung eines solchen Profils kann direkt auf den Salzgehalt der Eiszeit geschlossen werden (vgl. *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 (vgl. *Dahl-Jensen et al. 1998*).

Korngrenzen erscheinen in Regenbogenfarben; die im Eis eingeschlossenen Gasblasen sind dunkel und haben einen Durchmesser von etwa 1 bis 3 mm. Durch die Analyse der Gaszusammensetzung in den Blasen können die Konzentrationen der wichtigsten Treibhausgase (CO₂, CH₄, und N₂O) über die letzten 650 000 Jahre rekonstruiert werden.

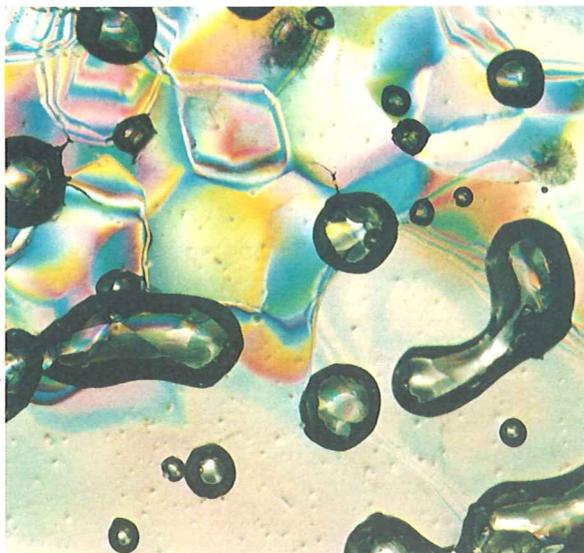


Foto 1: Dünnschliff einer polaren Eisprobe, beleuchtet durch gekreuzte Polarisationsfilter

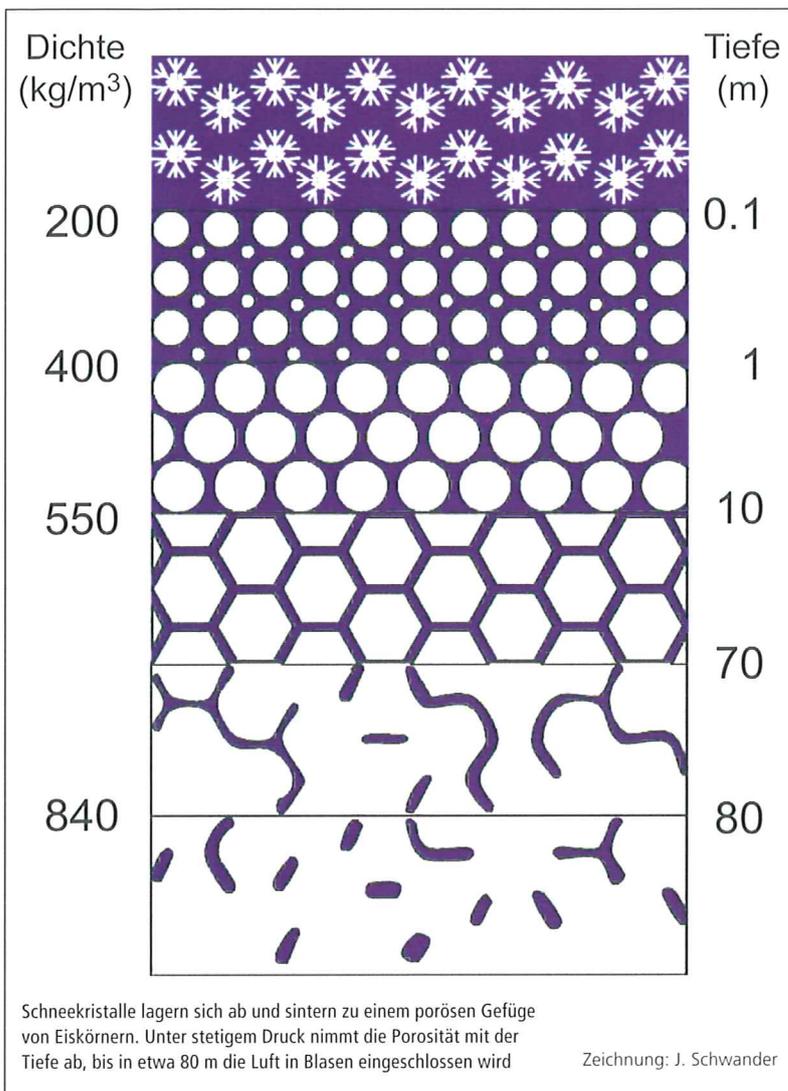


Abb. 1: Schematische Darstellung der obersten ca. 80 m auf dem Eisschild in Grönland oder der Antarktis

Es gibt verschiedene Methoden zur direkten Rekonstruktion von Klimavariablen aus polaren Eisbohrkernen. Die obersten 80 bis 100 m eines polaren Eisschildes bestehen aus porösem Firn, durch den Luftmoleküle zirkulieren können (vgl. Abb. 1). Dabei stellt sich ein nahezu perfektes diffusives Gleichgewicht ein. An der Firnbasis werden durch den hohen Druck des darüber liegenden 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 (vgl. Foto 1). In grönländischem Eis beträgt der Altersunterschied ca. 200 Jahre, in der Antarktis wegen des viel geringeren

Niederschlags sogar 3 000–5 000 Jahre. Falls es gelingt, die Gaskonzentration der im Eis eingeschlossenen Luft präzise zu bestimmen, und falls gezeigt werden kann, dass Gaskonzentrationen

im Eis erhalten bleiben, sind polare Eisbohrkerne die einzigen Klimaarchive, die die vergangene Zusammensetzung der Atmosphäre zu rekonstruieren vermögen.

Abb. 2 zeigt die CO₂-Konzentrationen über die letzten 650 000 Jahre aus Rekonstruktionen von verschiedenen antarktischen Eisbohrkernen (vgl. Petit et al. 1999, Siegenthaler et al. 2005). Der Anstieg von CO₂ über die vergangenen 50 Jahre hat bereits deutlich die natürlichen Grenzen verlassen. Die Messungen an polaren Eisbohrkernen zeigen ebenfalls die enge Beziehung zwischen CO₂-Konzentration und Temperatur: während der Eiszeiten sind die CO₂-Konzentrationen niedrig und im Bereich von etwa 200 ppm, während der Warmzeiten liegen sie bei etwa 280 ppm. Die heutige Konzentration (2006) ist bereits bei 384 ppm und steigt weiterhin an. Aktuelle CO₂-Werte, gemessen auf Mauna Loa (Hawa‘ii), werden auf www.cmdl.noaa.gov/ccgg/trends zur Verfügung gestellt.

Polare Eisbohrkerne ermöglichen die Einbettung der Messungen der letzten 50 Jahre in einen langfristigen Zusammenhang. Frühere Spekulationen, dass der Anstieg der atmosphärischen Kon-

Die Messungen am ältesten Eis (Alter 650 000 Jahre) erfolgten im Rahmen des European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA). Die Temperatur in der Antarktis kann durch die Messung der stabilen Isotope des Wassermoleküls abgeschätzt werden (rote Kurve).

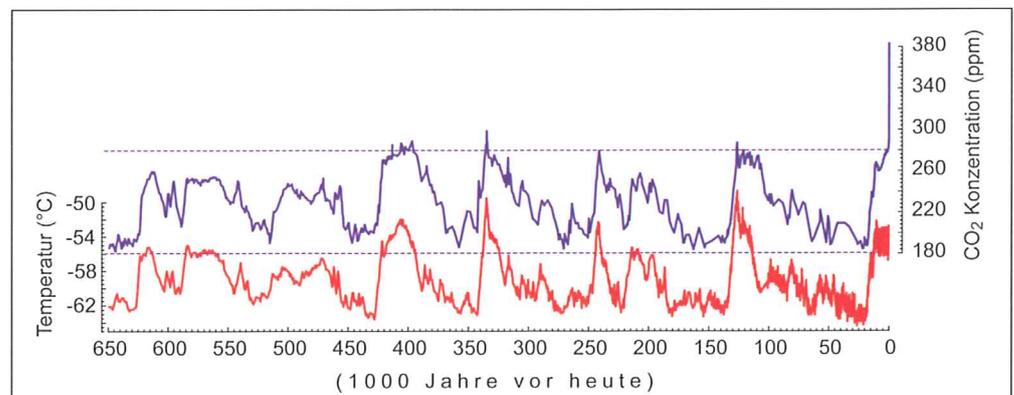


Abb. 2: Rekonstruktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration über die letzten 650 000 Jahre gemessen an verschiedenen Eisbohrkernen der Antarktis, sowie der Anstieg über die letzten 50 Jahre aus direkten Messungen der Atmosphäre (blaue Kurve)

zentration von CO_2 und anderen Treibhausgasen seit der Industrialisierung die Folge natürlicher Zyklen seien, konnte auf diese Weise schlüssig widerlegt werden.

Gasmessungen und modernste Extraktions- und Messtechniken erlauben die direkte Rekonstruktion weiterer wichtiger Größen des Klimasystems. Gase in der Firmsäule stehen nahezu im diffusiven Gleichgewicht mit der Atmosphäre. Aufgrund der statistischen Thermodynamik tritt eine Fraktionierung von Molekülen unterschiedlicher Masse auf. Diese Fraktionierung ist proportional zum Massenunterschied der Moleküle und hängt von der Firtiefe und dem Temperaturkontrast in der Firmsäule, ΔT , ab. Je tiefer die Firmsäule und je größer ΔT , desto größer ist die massenabhängige Fraktionierung. Die Gaszusammensetzung wird an der Firnbasis beim Blasenabschluss konserviert, und kann an polaren Eisbohrkernen gemessen werden.

Mit mehreren Isotopenpaaren der Luft ($^{14}\text{N}^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_2$, $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ und weitere) werden nun die verschiedenen Informationen sepa-

riert. Insbesondere kann ΔT bestimmt werden. Da Wärme im Firn viel langsamer als Gas diffundiert, verursachen abrupte Temperaturschwankungen an der Oberfläche Fraktionierungen der Gase an der Firnbasis, die durch den Blasenabschluss „eingefroren“ werden. Dieses „Gas-Isotopen-Thermometer“ wurde bereits mehrfach in Grönland angewendet (vgl. Lang et al. 1999, Severinghaus und Brook 1999, Huber et al. 2006), und es konnte gezeigt werden, dass die Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (vgl. Dansgaard et al. 1984, Oeschger et al. 1984, Dansgaard et al. 1993), Temperaturänderungen von ca. 8 bis 16°C in Grönland entsprachen (vgl. Abb. 3).

Indirekte Klimainformation aus polarem Eis

Die meisten Größen, die an polaren Eisbohrkernen gemessen werden können, liefern jedoch indirekte Information, Proxydaten, über das Klimageschehen sowie über die lokalen und regionalen Umweltbedingungen an der

Bohrstelle. Willy Dansgaard konnte zeigen, dass im Niederschlag das Isotopenverhältnis von Wasser, $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$, mit zunehmender geographischer Breite monoton abnimmt und deshalb sehr stark mit der Lufttemperatur korreliert (vgl. Dansgaard 1964). Aufgrund dieser Beobachtung vermutete er, dass aus den zeitliche Variationen von $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ im Niederschlag an einem festen Ort auf Veränderungen in der Temperatur geschlossen werden könne. Dieses „Wasser-Isotopen-Thermometer“ liefert allerdings im Gegensatz zum Gas-Isotopen-Thermometer nur eine indirekte Klimaaufzeichnung, denn $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ ist nicht nur lokal beeinflusst, sondern enthält Informationen entlang dem gesamten Weg der Wassermoleküle von ihrer Verdunstung an einer bestimmten Stelle der Ozean- oder Landoberfläche, über Kondensations- und Verdunstungsprozesse während des Transports, und schließlich bei der Kondensation an der Depositionsstelle.

Dennoch haben verschiedene unabhängige Studien gezeigt, dass Dansgaard's Annahme bei vielen Eisbohrkernen zulässig ist, dass aber die Korrelation zwischen lokaler Temperatur und $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ besonders in Grönland stark vom Klimazustand abhängt, also zwischen Eiszeit und Warmzeit verschieden war. Gegenwärtig werden über 50 verschiedene Parameter am Eis und an der im Eis eingeschlossenen Luft gemessen. Stellvertretend für die wachsende Anzahl der gemessenen Größen sind die drei wichtigsten in Abb. 4 für den Eisbohrkern von Dome Concordia (Antarktis) dargestellt. Deutlich erkennbar

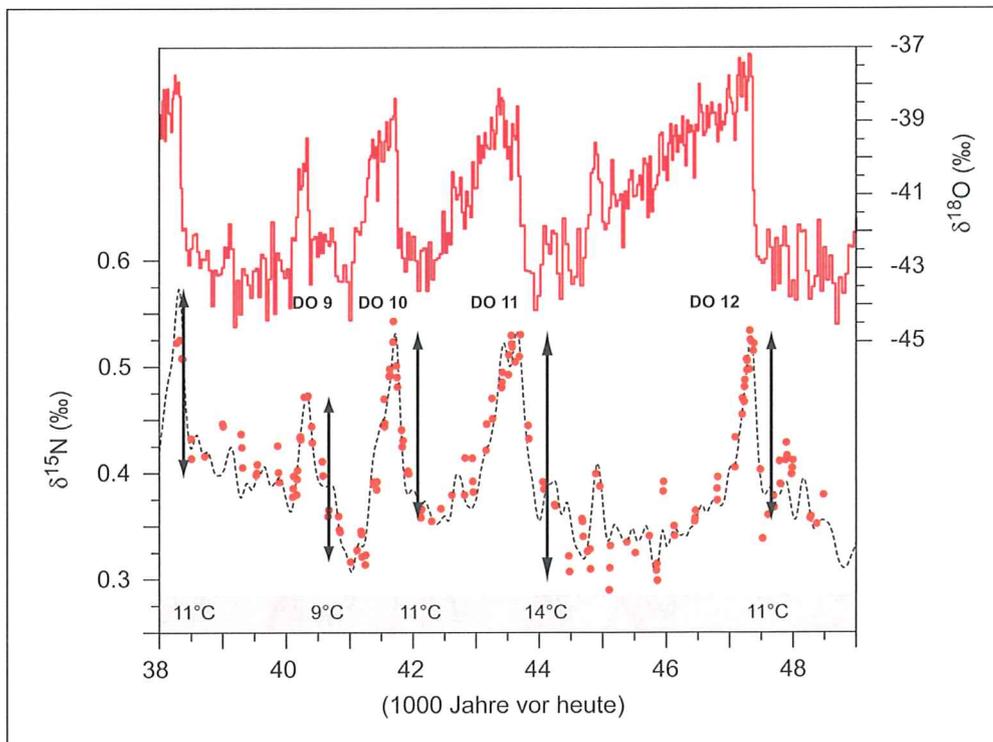


Abb. 3: Direkte Temperaturrekonstruktion anhand der Messung des Verhältnisses schwererer und leichter Stickstoffmoleküle ($^{14}\text{N}^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_2$, orange Punkte) am Eisbohrkern von North GRIP (75.10°Nord , 42.32°West) auf Grönland

Quelle: Huber et al. 2006

Die Höhe der Spitzen in den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten ist proportional zum Temperatursprung. Zum Vergleich ist die indirekte Temperaturabschätzung mit Hilfe der stabilen Isotope des Wassermoleküls ebenfalls angegeben (rote Kurve). Isotopenvariationen werden als relative Abweichung von einem Standard in der δ -Notation ausgedrückt, also $\delta^{18}\text{O} = 1000 \times [(\text{H}_2^{18}\text{O} / \text{H}_2^{16}\text{O}) / (\text{H}_2^{18}\text{O} / \text{H}_2^{16}\text{O})_{\text{std}} - 1] \text{‰}$.

Zu Abb. 4: Eisbohrkern Dome Concordia

Der 3 270 m lange Eisbohrkern deckt eine Klimageschichte von über 800 000 Jahren ab.

Die Abb. ist hier auf der Tiefenskala des Kerns abgebildet, um zu verdeutlichen, dass aufgrund der Verformung des Eises ca. 100 000 Jahre in der oberen Hälfte, und ca. 700 000 Jahre in der unteren Hälfte des Eisbohrkernes sind.

Neben der Isotopenkonzentration ($\delta D = 1000 \times [(^1H_2H^{16}O / ^1H_2^{16}O) / (^1H_2H^{16}O / ^1H_2^{16}O)_{std} - 1] \text{‰}$) sind stellvertretend drei chemische Parameter dargestellt. Die Konzentration des Ca^{2+} -Ions ist dabei ein Indikator für den Staubgehalt der Atmosphäre. Dieser ist maximal während der Eiszeiten und minimal während der Warmzeiten, weil die stärkeren Winde Staub von Wüstengebieten besser mobilisieren und dieser wegen der Trockenheit in der Eiszeitatmosphäre in größeren Mengen in die Polargebiete transportiert wird.

Aus den Na^+ -Daten kann indirekt auf die Ausdehnung des Meereises geschlossen werden. Bei der Ausfrierung von Meereis werden Meersalzkrystalle dem Wind ausgesetzt. Diese werden dann als Salzaerosol auf den Eisschild verfrachtet und abgelagert.

Schließlich können mit Hilfe der Sulphatkonzentration, SO_4^{2-} einzelne Vulkanereignisse identifiziert werden; langfristige Trends von SO_4^{2-} sind andererseits Hinweis auf verstärkte Aktivität von marinen Organismen.

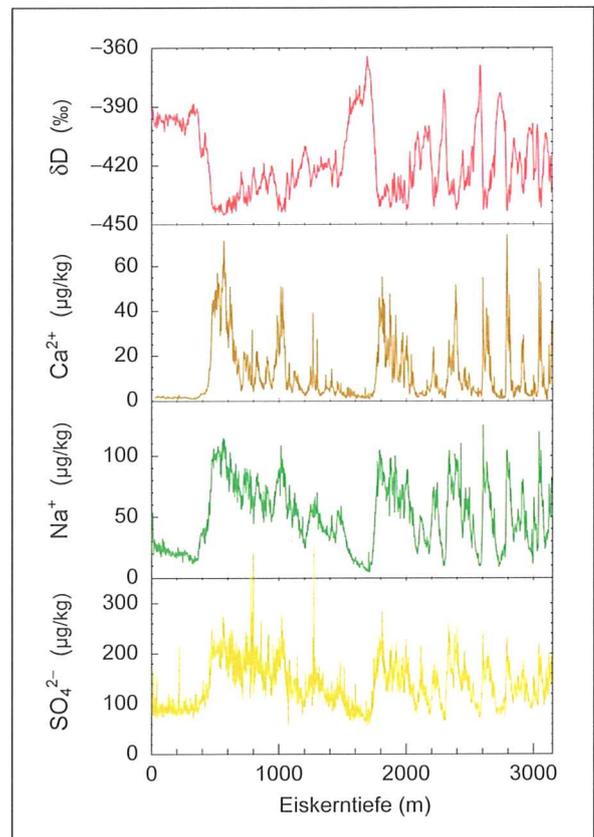


Abb. 4: Beispiele von hochauflösenden Messungen am Eisbohrkern von Dome Concordia

Quelle: Wolff et al. 2006

sind dort acht aufeinanderfolgende Eiszeiten (vgl. Textbox zu Abb. 4).

Abrupte Klimaschwankungen

Die Isotopenmessungen am ersten tiefen Eisbohrkern von Grönland, Camp Century, zeigten, dass $H_2^{18}O/H_2^{16}O$ während der letzten Eiszeit reduziert war. Somit konnte zum ersten Mal eine physikalisch basierte Abschätzung der Änderung der Temperatur im Zusammenhang mit Eiszeiten gemacht werden (vgl. Dansgaard et al. 1969). Das Isotopenthermometer lieferte aber auch Überraschungen. In sämtlichen Eisbohrkernen Grönlands, die bis in die letzte Eiszeit reichen, können abrupte Erwärmungen nachgewiesen werden.

Die letzte dieser Erwärmungen erfolgte 11 650 Jahre vor heute und markiert den Beginn des Holozäns. Dass diese schnellen Temperaturschwankungen in Grönland ein überregionales Signal sind, hat Hans Oeschger (1927–1998), Klimaphysiker an der Universität Bern, erkannt. Isotopenmessungen an spätglazialen Karbonatsedimenten im Gerzensee (Kanton Bern), wiesen dieselben Abfolgen auf wie diejenigen des Isotopenthermometers von Dansgaard (vgl. Oeschger et al. 1984). Diese ausgezeichnete Korrelation zeigt, dass die Klimaschwankungen sicher von großräumiger Natur, und in ihren Auswirkungen hemisphärisch, oder vielleicht sogar global waren. Seither

sind diese schnellen Erwärmungen während der letzten Eiszeit als Dansgaard/Oeschger-Ereignisse bekannt geworden.

Die neuesten, hochauflösenden Analysen am Eisbohrkern von North GRIP zeigen 25 Dansgaard/Oeschger-Ereignisse (vgl. North-GRIP Members 2004). Die zeitliche Abfolge der verschiedenen Ereignisse ist erstaunlich ähnlich: Nach einer schnellen Erwärmung, die innerhalb von wenigen Jahrzehnten stattfindet, erfolgt eine allmähliche Abkühlung über mehrere hundert bis einige tausend Jahre. Dies führt zur charakteristischen Sägezahnform der Grönlandtemperatur (vgl. Abb. 5). Das

Zeitfenster von 60 000 bis 30 000 Jahre vor heute erweist sich als besonders dynamisch; während des Hochglazials um 20 000 Jahre, also dem niedrigsten Stand des Meeresspiegels, sind diese abrupten Erwärmungen verschwunden

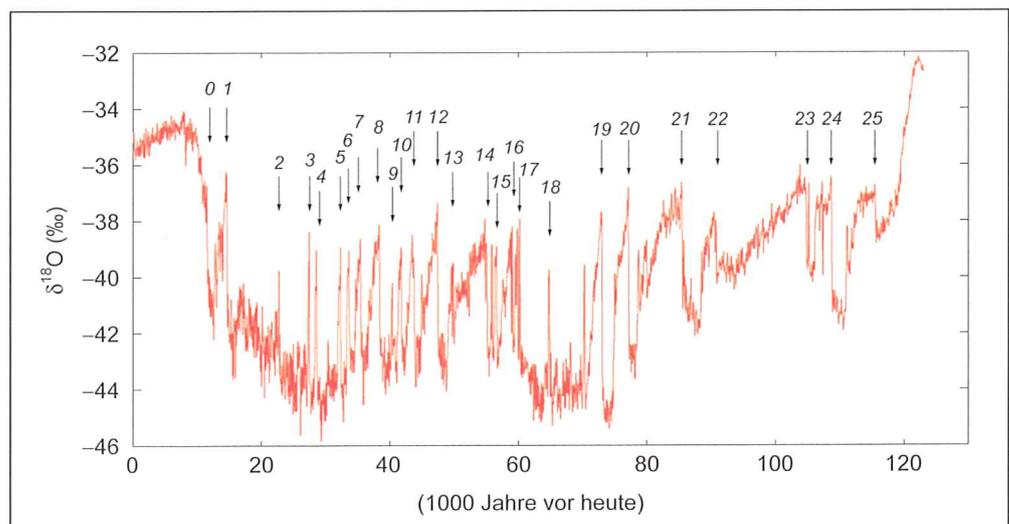


Abb. 5: Temperaturrekonstruktion anhand der Messung des Verhältnisses schwererer und leichter Wasser-moleküle ausgedrückt als $\delta^{18}O$ (siehe Abb. 3) am Eisbohrkern von North GRIP auf Grönland. 25 abrupte Erwärmungen, bekannt als Dansgaard-Oeschger-Ereignisse, sind während der letzten Eiszeit aufgetreten

Quelle: NorthGRIP Members 2004

(vgl. *Stocker 2000, Rahmstorf 2002*). Dies belegt, dass das Klimasystem, abhängig vom Klimazustand, mit unterschiedlicher Sensitivität reagiert. Die brennende Frage an die Eisbohrkerne und andere Klimaarchive ist nun, ob diese abrupten Schwankungen ein charakteristisches Verhalten des Klimas der Eiszeit darstellen, und somit auch in früheren Eiszeiten nachgewiesen werden können.

Die thermische Nord-Süd-Klimaschaukel

Die präzise Bestimmung der Gaszusammensetzung in Eisbohrkernen von Grönland und der Antarktis ist von zentraler Bedeutung für das Verständnis abrupter Klimaschwankungen. Jedes Dansgaard-Oeschger-Ereignis ist durch ein Maximum in CH_4 (Methan) markiert, das einige 10 bis 100 Jahre andauert, und das in Eiskernen sowohl der Antarktis wie auch von Grönland sehr präzise nachgewiesen werden kann. Da sich CH_4 -Änderungen in der Atmosphäre schnell und global 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 Dansgaard/Oeschger-Ereignisse im Grönlandeis zeitlich mit Warmphasen in der Antarktis zusammenfallen.

Diese wichtige Beobachtung über die Dynamik des globalen Klimasystems hat zu verschiede-

nen Spekulationen über Mechanismen in Atmosphäre und Ozean geführt, welche das Klimaverhalten der Nord- und Südhemisphäre miteinander verbinden. 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 (vgl. *Blunier et al. 1998*). Andererseits erfolgte gerade zum Zeitpunkt der Erwärmung in Grönland die Umkehr des südlichen Erwärmungstrends, was eher die Dominanz des Nordens 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 (vgl. *Crowley 1992, Stocker et al. 1992*). Diese Zirkulation ist Teil einer globalen Strömung, die den ganzen Ozean umspannt: Wasser sinkt im Nordatlantik in die Tiefe, fließt entlang der westlichen Ränder südwärts und verteilt sich in die verschiedenen Ozeanbecken. Salopp kann die Strömung als globales „Förderband“ bezeichnet werden. Im Atlantik hat diese Strömung eine besondere klimatische Bedeutung. Dort werden etwa 1015 Watt Wärme nordwärts transportiert, welche die milden Bedingungen Westeuropas prägt.

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 (vgl. *Abb. 6, links*). Damit war die Hypothese der „bipolar seesaw“ (bipolare Klimaschaukel) formuliert (vgl. *Broecker 1998, Stocker 1998*). Die „bipolar seesaw“ sagt voraus, dass Norden und Süden sich zeitlich identisch, jedoch mit unterschiedlichem Vorzeichen ändern: Wird es im Norden kalt, so erwärmt sich der Süden. Diese perfekte Synchronisation von Klimaschwankungen wird jedoch in Eisbohrkernen 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 (vgl. *Stocker und Johnsen 2003*). Eine abrupte Unterbrechung des meridionalen Wärmetransports 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 (vgl. *Abb. 6, rechts*).

Weil der Wärmefluss zwischen Südatlantik und Südlichem Ozean proportional zum Temperaturunterschied zwischen den beiden Reservoiren ist, stellen die Variationen der Temperatur im südlichen Ozean das zeitliche Integral der Signale im Nordatlantik dar. Aus dieser einfachen physikalischen Interpretation folgt, dass abrupte Temperaturschwankungen im Norden zu langsamen Erwärmungen und Abkühlungen führen. Die Zeitskala ist in dieser Modellvorstellung durch die thermische Trägheit des südlichen Reservoirs bestimmt.

Bei bekannter nordhemisphärischer Temperatur können wir somit eine Voraussage über die

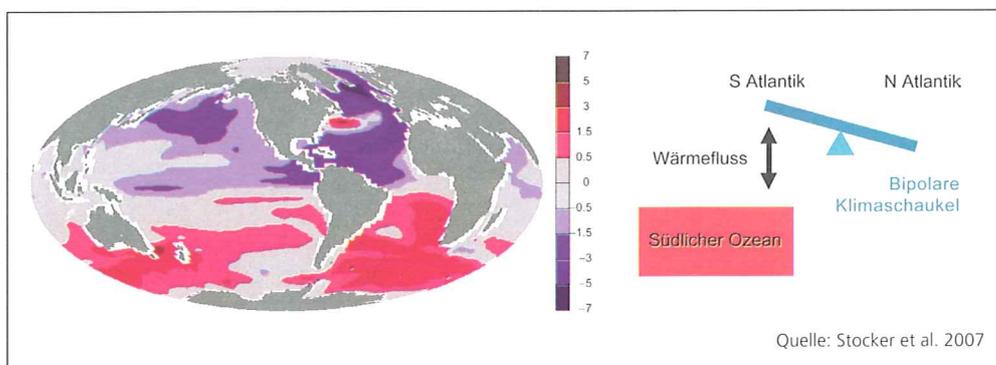


Abb. 6: Simulationen mit dem gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modell CCSM3 von der Uni Bern

Links: Änderung der Oberflächentemperatur, wenn sich die thermohaline Zirkulation im Atlantik abstellt. Eine Abkühlung im Norden wird durch eine Erwärmung im Süden thermisch kompensiert.

Rechts: Schematische Darstellung der Klimaschaukel, die thermisch mit dem Südlichen Ozean gekoppelt ist.

Änderungen der südlichen Temperatur machen. In diesem Sinne ist das ein Klimamodell, wenn auch 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.

Dasselbe Modell macht aber auch eine Voraussage, die mit den nun neu erbohrten Eiskernen der Antarktis überprüft werden kann. Jedes der 25 Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (vgl. Abb. 5) wird im Süden eine zeitlich integrierte Signatur hinterlassen, deren Amplitude von der Länge des vorangehenden Kaltzustandes abhängt. Bisher sind jedoch nur sieben solcher Ereignisse (A1, A2, ... A7) eindeutig identifiziert worden. Die Voraussage des „seesaw“-Modells ist in Abb. 7 dargestellt. Gemäß Modellvorstellung sollten die südlichen Signale besonders stark in der Nähe des Südatlantiks ausfallen. Bisher sind aber die verfügbaren Eisbohrkerne sehr weit vom Atlantik entfernt, und weitere Erwärmungen können in Abb. 7 höchstens vermutet werden.

Mit der Erbohrung des Kernes in Dronning Maud Land im Rahmen des European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) sind wir nun erstmals in der Lage, diese Hypothese zu testen. Mit einer geographischen Länge von 0° 4' Ost liegt dieser Eisbohrkern direkt gegenüber dem Südatlantik. Erste Analysen bestätigen die Hypothese der Nord-Süd-Klimaschaukel (vgl. EPICA Community Members 2006).

800 000 Jahre Klimageschichte aus der Antarktis

Im Rahmen des europäischen Projekts EPICA wurden während der vergangenen neun Jahre Eisbohrkerne aus zwei unterschiedlichen Regionen der Antarktis erbohrt. Sowohl auf Dome Concordia wie auch bei Kohlen-Station konnten die Bohrungen erfolgreich beendet werden. Die Details der Stationen, sowie einige Angaben zu anderen

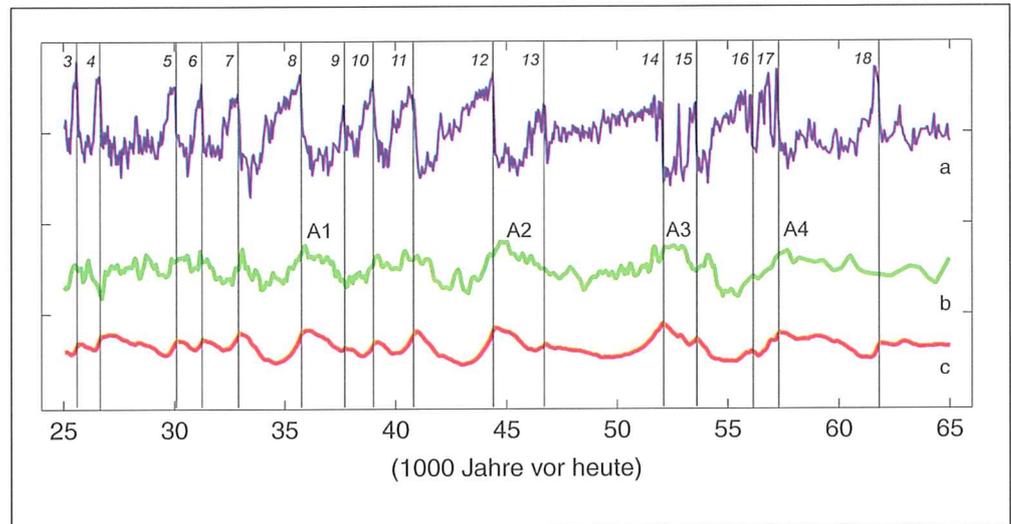


Abb. 7: Hochpassgefilterte Zeitreihen der stabilen Isotopenkonzentration an den Eisbohrkernen von GRIP (Grönland, Kurve a) und Byrd-Station (Antarktis, Kurve b) und mit dem einfachen „bipolar seesaw“-Modell simulierte Temperaturkurve. Jedes Dansgaard-Oeschger-Ereignis ist als Umkehr eines langsamen Erwärmungstrends in der Antarktis sichtbar (Kurve c)

Quelle: Stocker und Johnsen 2003

aktiven Bohrprojekten in der Antarktis sind in Tab. 1 und 2 zusammengefasst. EPICA ist eine Kooperation von zehn Nationen in Europa, die von der Europäischen Kommission in drei Rahmenforschungsprogrammen unterstützt wurde. Für die Logistik waren Frankreich, Italien und Deutschland verantwortlich. Die Abteilung für Klima- und Umweltphysik 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, konti-

nuierliche Analyse chemischer Substanzen am Eis).

Mit dem Kern von Dome Concordia ist es zum ersten Mal möglich, die Klimageschichte über die letzten 400 000 Jahre, die bisher vom Eisbohrkern von Vostok Station abgedeckt war (vgl. Petit et al. 1999), wesentlich zu verlängern (vgl. Abb. 8). Dabei wird nun eine Klimaphase untersucht, die sich in der Struktur völlig von den letzten 400 000 Jahren unterscheidet. Bisher hatte man vermutet, dass die Eiszeitzyklen der letzten Million Jahre primär durch den 100 000 Jahr Zyklus der Erdbahnelemente geprägt sei. Der neue

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

	Dome Concordia	Dronning Maud Land
Geographischer Name	Dome C	Dronning Maud Land
Stationsname	Concordia Station	Kohlen Station
Koordinaten	75° 06' Süd, 123° 21' Ost	75° 00' Süd, 0° 04' Ost
Höhe über Meer	3 233 m	2 892 m
Jahresmitteltemperatur	- 54.5°C	- 44.6°C
Mittlerer Niederschlag	2.5 cm/a	6.4 cm/a
Eisdicke	3 309 ± 20 m	2 750 ± 50 m
Bohrtiefe	3 270,2 m (21.12.2004)	2 774,2 m (17.1.2006)
geschätztes Eisalter	910 000 Jahre	180 000 Jahre

Beide Tiefbohrungen sind erfolgreich abgeschlossen.

Tab. 2: Aktive und geplante Tiefbohrprojekte in der Antarktis

Station	Koordinaten	Höhe ü. M.	T _{Mittel}	Niederschlag	Land*	Status
Dome A	80° 00' Süd, 77° 21' Ost	4 093 m	-59°C	~ 1–2 cm/a	China	Beginn 2009/10
Dome Fuji	77° 19' Süd, 39° 42' Ost	3 810 m	-54°C	2.5 cm/a	Japan	3 028,5 m (24.1.06)
WAIS	79° 32' Süd, 122° 00' West	1 759 m	-31°C	24 cm/a	USA	Beginn 2006/07
Talos Dome	72°47' Süd, 159° 04' Ost	2 319 m	-41°C	8.3 cm/a	Italien**	607,7 m (14.1.06)
Berkner Island	79°34 'Süd, 45°42' West	890 m	-26°C	13 cm/a	UK**	948,5 m (13.1.05)

* Führung des jeweilig angegebenen Landes, ** bezeichnet ein Konsortium mehrerer Länder. Die Bohrungen in Dome Fuji und Berkner Island wurden erfolgreich abgeschlossen.

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: Erst vor 400 000 Jahren wurden die hohen Temperaturen, die während der jüngsten vier Warmzeiten in der Antarktis rekonstru-

iert wurden, erreicht. Über den Grund dieses zuvor kühleren Klimas in der Antarktis, und wohl in weiten Teilen des Planeten, kann im Moment nur spekuliert werden. Bestätigt ist immerhin, dass die Treibhausgaskonzentrationen niedriger gewesen sind, was einen Beitrag zur Abkühlung lieferte (vgl. Siegenthaler et al. 2005, Spahni et al. 2005). Eine Vermutung ist, dass auf den Kontinenten der Nordhemisphäre noch Überreste von Eisschilden der vorangehenden Eiszeiten vorhan-

den waren, die durch den Eis-Albedo-Effekt, der eine starke positive Rückkoppelung der Strahlungsbilanz darstellt, eine Abkühlung bewirkten.

Aus Abb. 8 erkennt man, dass während der acht vollständigen Eiszeiten, die in diesem Eisbohrkern enthalten sind, auch Klimaschwankungen des Typs A1-A4 nach Abb. 7 vorhanden sind. Falls also das „Klimamodell“ der „bipolar seesaw“ eine universelle Gültigkeit hat, dann können wir versuchen, die nördliche Temperatur via die Kenntnis von Temperaturrekonstruktionen der Antarktis zu rekonstruieren (vgl. Siddall et al. 2006). 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 CH₄ 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 wohl ähnlich war.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Polare Eisbohrkerne gehören zu den Eckpfeilern der Paläoklimafor-

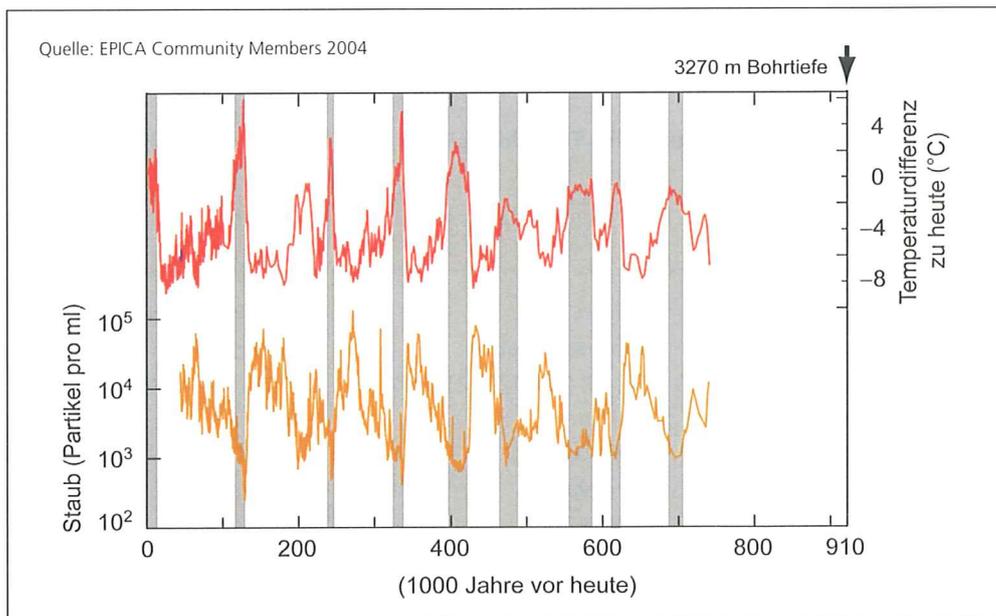


Abb. 8: Temperatur-Rekonstruktion anhand von stabilen Isotopen des Eises, und Staubkonzentration, gemessen am EPICA Eisbohrkern von Concordia-Station (Antarktis). Warmzeiten (graue Streifen) sind durch geringere Staubkonzentrationen gekennzeichnet

Textbox: Zukünftige Forschung: International Partnerships in Ice Coring Sciences (IPICS)

Zum Anlass des Internationalen Polarjahres 2007/2008, und zur koordinierten Planung zukünftiger Bohrprojekte in Grönland und der Antarktis haben im Jahr 2004 Wissenschaftler aus 19 Ländern die International Partnerships in Ice Coring Sciences (IPICS) gebildet. Ziel ist, die Planung aufwändiger und logistisch schwieriger Eisbohrprojekte zu koordinieren und gemeinsame Ressourcen zu nutzen. IPICS hat vier Fokusprojekte formuliert:

- Erbohrung des ältesten Eises der Antarktis, das eine kontinuierliche Klimageschichte aufweist: Die gegenwärtige, jedoch beschränkte Kenntnis der Klimatologie und Topographie der Antarktis lässt vermuten, dass an einigen besonderen Stellen in der Ostantarktis, Eisbohrkerne gefunden werden können, welche die letzten 1,5 Mio. Jahre abdecken. Damit können erstmals die Klimaphase der dominante 40 000 Jahr-Zyklen untersucht, und die lange vermutete kontinuierliche Abnahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration quantifiziert werden.
- Das IPICS 40 000 Jahr-Netzwerk: Abrupte Klimaschwankungen und das Ende der letzten Eiszeit sind Ausdruck der komplexen Dynamik des Klimasystems. Durch ein Netzwerk von Eisbohrkernen um die Peripherie der Antarktis kann die Frage geklärt werden, ob abrupte Klimaschwankungen überregionaler Struktur auch in der Antarktis auftreten.
- Das IPICS 2000 Jahr-Netzwerk: Die subsaisonale und räumliche Analyse des Klimas der Antarktis der letzten 2 000 Jahre erlaubt die Verknüpfung mit hemisphärischen und globalen Strukturen natürlicher Klimavariabilität wie beispielsweise der Annular Mode und El Niño.
- Die vorletzte Warmzeit (Eem) in Grönland: Die Erbohrung eines neuen Kerns in Nordwestgrönland ermöglicht mit großer Wahrscheinlichkeit zum ersten Mal ein Einblick in das Klimageschehen des vorletzten Übergangs und die geringere Ausdehnung des Grönländischen Eisschildes zu einer Zeit, in der es wärmer war als heute. Diese Information ist zentral für das Verständnis der Stabilität des Grönländischen Eisschildes unter globaler Erwärmung.

Weitere Informationen unter:

www.pages-gbp.org/science/initiatives/ipics/index.html

von Proxydaten einige wichtige Parameter des Klimasystems direkt aufzeichnen. Die Bestimmung der Konzentrationen der drei wichtigsten Treibhausgase, CO₂, CH₄ und N₂O, über die letzten 650 000 Jahre liefert die Randbedingungen für die Strahlungsbilanz der Atmosphäre, die unerlässlich sind für die quantitative Modellierung vergangener Klimazustände.

Durch die besondere geographische Lage und die vergleichsweise uniformen Verhältnisse über viele 100 km sind die Aufzeichnungen

in polaren Eisbohrkernen weniger beeinflusst durch natürliche Variabilität und das Wettergeschehen. Somit besteht das Potential, dass aus vielen gemessenen Parametern überregionale Information gewonnen werden kann.

Die zwei wohl wichtigsten Ergebnisse, die aus polaren Eisbohrkernen gefunden wurden, und die die Wissenschaft und das Verständnis des Klimasystems der Erde revolutioniert haben, sind:

- Messungen der Luftzusammensetzung der Gasblasen in Eis-

bohrkernen der Antarktis haben den Beweis erbracht, dass die Konzentrationen der beiden wichtigsten Treibhausgase, CO₂ und CH₄, über Eiszeitzyklen innerhalb enger Grenzen schwanken und dass sie heute um über 27 %, bzw. über 250 % höher sind als je zuvor in den letzten 650 000 Jahren.

- Messungen der stabilen Isotope des Eises und der Luftkomponenten, sowie viele Parameter in Eisbohrkernen von Grönland zeigen eine Abfolge von plötzlichen Erwärmungen von 8 bis 16° C in Grönland. Dies weist darauf hin, dass Klimazustände nur beschränkt stabil sind und auf Störungen oder Veränderungen nicht-linear reagieren können. Die abrupten Änderungen wurden nachfolgend in vielen anderen Klimaarchiven ebenfalls nachgewiesen und sind von globaler Bedeutung.

Eine große Herausforderung der Forschung ist nach wie vor die bessere und umfassendere quantitative Interpretation von Eisbohrkerndaten mit globalen Klimamodellen. In diese Analyse werden andere hochauflösende Klimaarchive integriert werden müssen. Die große geographische Entfernung polarer Eisschilde von Orten, wo wichtige dynamische Prozesse des Atmosphäre-Ozean-Landoberfläche Systems stattfinden, stellt aber einen Nachteil dieses Klimaarchivs dar. Dies kann zum Teil kompensiert werden durch die Anwendung einer Hierarchie von physikalisch basierten Modellen bei der Interpretation von Resultaten aus polaren Eisbohrkernen.

Mit solchen Modellen soll nicht nur versucht werden, bereits vorhandene Klimadaten möglichst genau nachzusimulieren, um die Güte eines Klimamodells zu demonstrieren. Spannender ist der Ansatz, mit Klimamodellen Voraussagen zu machen, die dann verifiziert oder falsifiziert werden. Wir haben gezeigt, dass mit einem äußerst einfachen Konzeptmodell eine solche Voraussage über abrupte Klimaänderungen gemacht werden kann. Mit Hilfe von hoch-

auflösenden Daten aus Eisbohrkernen wird es in nächster Zukunft möglich sein, diese Voraussetzungen nachzuprüfen.

Eisbohrkerne werden auch in Zukunft grundlegende Informationen zum besseren Verständnis des Klimasystems liefern (vgl. *Textbox*). Neben technologischen Entwicklungen und Innovationen in der Analytik, die die Messung weiterer Parameter an Eisbohrkernen ermöglichen und die Präzision und Sensitivität erhöhen, werden neue Bohrungen in Grönland und der Antarktis sowohl die räumliche wie auch die zeitliche Auflösung erhöhen. Durch ein Netzwerk von Eisbohrkernen, die in jahreszeitlicher Auflösung analysiert werden, besteht die Möglichkeit, Klimaregime und ihre Veränderungen zu rekonstruieren. Dies ist ein erster Schritt zur Bestimmung der Statistik von Extremereignissen, ein für die Zukunft wichtiger Zweig der Klimaforschung, zu welchem polare Eisbohrkerne ebenfalls beitragen können. ■

Literatur

- ADKINS, J.F., K. MCINTYRE, D.P. SCHRAG, The salinity, temperature, and $\delta^{18}O$ of the glacial deep ocean, *Science* 298 (2002), S. 1769–1773
- BLUNIER, T., J. CHAPPELLAZ, J. SCHWANDER, A. DALLENBACH, B. STAUFFER, T.F. STOCKER, D. RAYNAUD, J. JOUZEL, H.B. CLAUSEN, C.U. HAMMER und S.J. JOHNSEN: Asynchronous of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period. *Nature* 394 (1998), S. 739–743
- BROECKER, W.S.: Paleocean circulation during the last deglaciation: a bipolar seesaw? *Paleoceanography* 13 (1998), S. 119–121
- CROWLEY, T.J.: North Atlantic deep water cools the southern hemisphere. *Paleoceanography* 7 (1992), S. 489–497
- DAHL-JENSEN, D., K. MOSEGAARD, N. GUNDESTROP, G.D. CLOW, S.J. JOHNSEN, A.W. HANSEN und N. BALLING: Past temperatures directly from the Greenland ice sheet. *Science* 282 (1998), S. 268–271
- DANSGAARD, W.: Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16 (1964), S. 436–468
- DANSGAARD, W., S.J. JOHNSEN, H.B. CLAUSEN, D. DAHL-JENSEN und N. GUNDESTROP, C.U. HAMMER, H. OESCHGER: North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. In: J.E. HANSEN und T. TAKAHASHI (eds.): *Climate Processes and Climate Sensitivity*. American Geophysical Union, Washington DC 1984, S. 288–298
- DANSGAARD, W., S.J. JOHNSEN, H.B. CLAUSEN, D. DAHL-JENSEN, N.S. GUNDESTROP, C.U. HAMMER, C.S. HVIDBERG, J.P. STEFFENSEN, A.E. SVEINBJÖRNSDÓTTIR, J. JOUZEL und G. BOND: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364 (1993), S. 218–220
- DANSGAARD, W., S.J. JOHNSEN, J. MOLLER und C.C. LANGWAY: One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet. *Science* 166 (1996), S. 377–381
- EPICA Community Members: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429 (2004), S. 623–628
- EPICA Community Members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444 (2006), S. 195–198
- HUBER, C., M. LEUENBERGER, R. SPAHNI, J. FLÜCKIGER, J. SCHWANDER, T.F. STOCKER, S. JOHNSEN, A. LANDAIS und J. JOUZEL: Isotope calibrated Greenland temperature record over Marine Isotope Stage 3 and its relation to CH_4 . *Earth and Planetary Science Letters* 243 (2006), S. 504–519
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Edited by S. Solomon. Cambridge 2007 (in press)
- LANG, C., M. LEUENBERGER, J. SCHWANDER und S. JOHNSEN: $16^\circ C$ rapid temperature variation in Central Greenland 70,000 years ago. *Science* 286 (1999), S. 934–937
- NorthGRIP Members: High-resolution climate record of the northern hemisphere back into the last interglacial period. *Nature* 431 (2004), S. 147–151
- OESCHGER, H., J. BEER, U. SIEGENTHALER, B. STAUFFER, W. DANSGAARD und C.C. LANGWAY: Late glacial climate history from ice cores. In: J.E. HANSEN und T. TAKAHASHI (eds.): *Climate Processes and Climate Sensitivity*. American Geophysical Union, Washington DC 1984, S. 299–306
- PETIT, J.R., J. JOUZEL et al.: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399 (1999), S. 429–436
- RAHMSTORF, S.: Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419 (2002), S. 207–214
- SEVERINGHAUS, J.P. und E.J. BROOK: Abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice. *Science* 286 (1999), S. 930–934
- SIDDALL, M., T.F. STOCKER, T. BLUNIER, R. SPAHNI, J. MC MANUS und E. BARD: Using a maximum simplicity paleoclimate model to simulate millennial variability during the last four glacial periods. *Quaternary Science Reviews* 25 (2006), S. 3185–3197
- SIEGENTHALER, U., T.F. STOCKER, E. MONNIN, D. LÜTHI, J. SCHWANDER, B. STAUFFER, D. RAYNAUD, J.-M. BARNOLA, H. FISCHER, V. MASSON-DELMOTTE und J. JOUZEL: Stable carbon cycle-climate relationship during the Late Pleistocene. *Science* 310 (2005), S. 1313–1317
- SPAHNI, R., J. CHAPPELLAZ, T.F. STOCKER, L. LOULERGUE, G. HAUSAMMANN, K. KAWAMURA, J. FLÜCKIGER, J. SCHWANDER, D. RAYNAUD, V. MASSON-DELMOTTE und J. JOUZEL: Atmospheric methane and nitrous oxide of the Late Pleistocene from Antarctic ice cores. *Science* 310 (2005), S. 1317–1321
- STOCKER, T.F.: The seesaw effect. *Science* 282 (1998), S. 61–62
- STOCKER, T.F.: Past and future reorganizations in the climate system. *Quaternary Science Reviews* 19 (2000), S. 301–319
- STOCKER, T.F. und S.J. JOHNSEN: A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Paleoceanography* 18 (2003), S. 1087
- STOCKER, T.F., A. TIMMERMANN, M. RENOLD und O. TIMM: Effects of salt compensation on the climate model response in simulations of large changes of the Atlantic meridional overturning circulation, *Journal of Climate*, submitted, 2007
- STOCKER, T.F., D.G. WRIGHT und W.S. BROECKER: The influence of high-latitude surface forcing on the global thermohaline circulation. *Paleoceanography* 7 (1992), S. 529–541
- WOLFF, E.W., H. FISCHER et al.: Southern Ocean sea ice extent, productivity and iron flux over the past eight glacial cycles. *Nature* 440 (2006), S. 491–496

Autor

Professor Dr. THOMAS STOCKER
Abteilung für Klima- und Umweltphysik,
Physikalisches Institut, Universität Bern
Sidlerstraße 5, 3012 Bern / SCHWEIZ
E-Mail: stocker@climate.unibe.ch

Summary

Polar Ice Cores – Pillars for Reconstructing Climates

by Thomas Stocker

Ice cores from Greenland and Antarctica are unique archives for past climate change. They permit the reconstruction of changes in temperature and concentrations of the major greenhouse gases. The longest climate history so far comes from the latest ice core from Dome Concordia (Antarctica) and covers the last 800,000 years. The second ice core was obtained from Dronning Maud Land and provides, for the first time, a detailed record of climate signals influenced by the southern Atlantic. Greenland ice cores exhibit a series of abrupt warmings which can be correlated with signals found in Antarctic cores.