

Kosmische Strahlung und Wolken

Eisbohrkerne liefern eine Fülle von Informationen über vergangene Umweltveränderungen. Sie sind aber auch geeignet, ganz spezifische Fragen zu klären oder Hypothesen zu testen. Eine solche Hypothese behauptet, dass Klimaänderungen primär durch Änderungen der Intensität der kosmischen Strahlung verursacht werden. Falls richtig, spielt der Treibhauseffekt nur eine untergeordnete Rolle. Eine politisch sehr brisante Hypothese, die einer genaueren Analyse bedarf.

1997 traten dänische Wissenschaftler vor die Presse und verkündeten nicht ohne Stolz, sie hätten die Erklärung für die globale Klimaerwärmung der letzten 150 Jahre gefunden [1]. Die entscheidende Rolle spielten weder der Treibhauseffekt noch die Solar-konstante (siehe Leitartikel, S. 3), sondern die globale Wolkenbildung (siehe Kasten). Diese werde durch die kosmische Strahlung beeinflusst und habe im 20. Jahrhundert deutlich abgenommen. Die Arbeit fand in der Öffentlichkeit grossen Anklang. Berichte in Zeitungen, Zeitschriften und im Fernsehen folgten Schlag auf Schlag und bald erschien auch ein Buch «Die launische Sonne» [2]. Da die dänische Hypothese die globale Klimaerwärmung als einen natürlichen Vorgang darstellt und den Menschen von jeglicher Verantwortung dafür entbindet, wurde sie insbesondere in solchen Kreisen

von Wirtschaft und Politik begeistert aufgenommen, die jegliche Massnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen ablehnen. Hier war die Wissenschaft gefordert und auch die EAWAG beteiligte sich an der Diskussion [3]. Dabei zeigte sich einmal mehr, dass Klimaänderungen sehr komplexe Vorgänge sind, die sich selten durch einen einzigen Prozess erklären lassen. Zu den wichtigsten potenziellen Ursachen für Klimaänderungen gehören nämlich Treibhausgase, die solare Irradianz, Aerosole, Vulkanausbrüche und interne Schwankungen des Klimasystems. Im Folgenden legen wir das Schwergewicht auf die ersten beiden.

Treibhausgase und Sonnenstrahlung

Seit ca. 1850 steigt die Temperatur auf der Nordhalbkugel relativ kontinuierlich an

(Abb. 1) [4–6]. Als mögliche Faktoren für diese Klimaänderung werden u.a. die Zunahme von Treibhausgasen und die Variation der Sonnenaktivität diskutiert:

■ Betrachtet man beispielsweise die Entwicklung von CO_2 als wichtigem Treibhausgas, zeigt sich über die letzten 150 Jahre tatsächlich eine exponentielle Zunahme, wobei die CO_2 -Konzentration ab Mitte des 20. Jahrhunderts besonders steil ansteigt (Abb. 1). Als Ursache für diesen exponentiellen Verlauf ist der steigende Verbrauch fossiler Brennstoffe allgemein anerkannt. Demgegenüber schwankte die Temperatur erheblich. Besonders auffällig sind zwei Temperaturerhöhungen in den Jahren von 1910 bis 1940 und von 1970 bis heute. Zwischen 1940 und 1970 kam es sogar zu einer leichten Abkühlung. Diese Schwankungen stehen im Widerspruch zur exponentiell ansteigenden CO_2 -Konzentration.

■ Im Fall der Sonnenstrahlung zeigen die seit 1980 durchgeführten Satellitenmessungen zwar, dass die Strahlungsintensität nicht konstant ist, sondern im 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus schwankt (siehe dazu Abb. 1, S. 8). Aber bei genauer Betrachtung stellt man fest, dass die Änderung der Solarkonstanten von 1367 W/m^2 über einen Sonnenfleckenzyklus weniger als 2 W/m^2

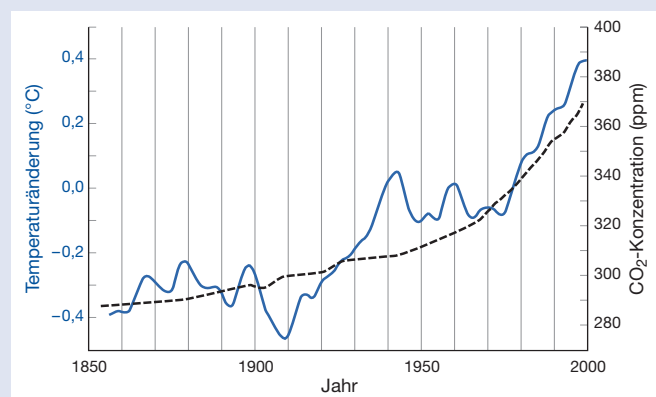


Abb. 1: Vergleich der globalen Temperaturänderungen seit 1850 (relativ zur Periode 1961–1990) mit den atmosphärischen CO_2 -Gehalten. Temperaturkurve: Mittelwert aus unzähligen Messdaten verschiedenster Wetterstationen [4]. CO_2 -Kurve: Daten bis 1953 aus Analysen der Luftblasen im Eisbohrkern von Siple [5], ab 1958 direkte CO_2 -Messungen auf Mauna Loa [6]. ppm = parts per million = Teile auf eine Million.

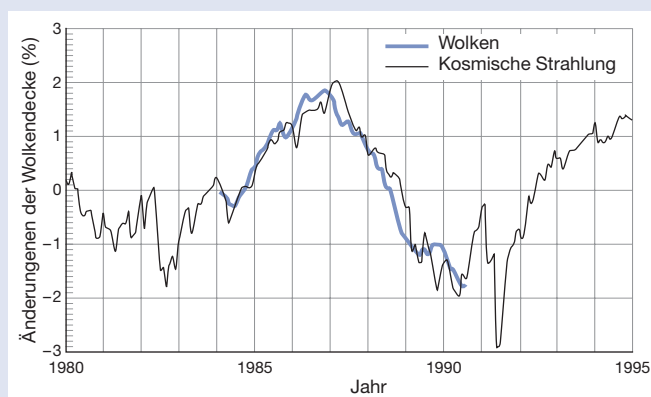


Abb. 2: Die Änderung der Wolkenbedeckung folgt dem Verlauf der kosmischen Strahlung zwischen 1980 und 1995 sehr gut und beträgt mehr als 2% [1]. Im gleichen Masstab aufgetragen sind die gleitenden 12-Monats-Mittelwerte der Wolkenbedeckung (ausgedrückt als Änderungen in Prozent) und die normalisierten, monatlichen Mittelwerte aus Messungen der kosmischen Strahlung in Colorado (USA).

beträgt, was ca. 0,15% entspricht und viel zu gering ist, um die beobachteten Temperaturänderungen zu erklären.

Damit kann keiner der beiden Faktoren die Klimaerwärmung alleine erklären. Soweit die heute allgemein anerkannte Sachlage, mit der auch die Dänen übereinstimmen. Wie aber argumentieren die Dänen weiter?

Kosmische Strahlung und Wolken

Die dänischen Wissenschaftler fragten sich, ob die kosmische Strahlung einen Einfluss auf unser Klima haben könnte. Je mehr kosmische Strahlung aus dem All in die Erdatmosphäre eindringt, desto stärker sollte die globale Bewölkung sein, so ihre Überlegungen (siehe Kasten). Um diese Hypothese zu überprüfen, schauten sie sich Sa-

Die Wolkenhypothese

Die Hypothese der dänischen Wissenschaftler Svensmark und Friis-Christensen [1] scheint einfach und einleuchtend: Die kosmische Strahlung – das sind hochenergetische Teilchen aus den Tiefen des Alls – dringt in die Atmosphäre ein und ionisiert dabei die Luft (Abb. 3). An diesen Ionen kondensiert die Luftfeuchtigkeit in Form kleiner Wassertröpfchen, was zur Wolkenbildung führt. Je mehr Wolken vorhanden sind, desto weniger Sonnenstrahlung erreicht die Erdoberfläche und damit wird es kälter. Andersherum wird es wärmer, wenn wenig Wolken am Himmel sind und die Sonnenstrahlen ungehindert auf die Erdoberfläche fallen können.

Wieviel kosmische Strahlung in die Erdatmosphäre eindringen kann, hängt vom Zusammenspiel zweier Faktoren ab, von der Sonnenaktivität und vom Erdmagnetfeld. Die Sonne schleudert permanent glühendes Gas in den Weltraum, das sich als so genannter Sonnenwind ausbreitet und dabei das Magnetfeld der Sonne mitträgt. Dieses solare Magnetfeld bildet einen äußeren Schutzschild um die Erde, der das Eindringen der kosmischen Strahlung in die Erdatmosphäre behindert (siehe Abb. 4 auf S. 5). Zusätzlich stellt das Erdmagnetfeld einen inneren Schutzschild dar, der diese Abschirmung verstärkt. Je aktiver also die Sonne und je stärker das Magnetfeld, desto weniger kosmische Strahlung dringt in die Erdatmosphäre ein.

tellitenbilder der Wolkenbedeckung aus den Jahren 1980 bis 1995 an und verglichen sie mit der Intensität der kosmischen Strahlung. Sie fanden, dass die Wolkenbedeckung in dieser Zeit um etwa 2% schwankte und genau dem Verlauf der kosmischen Strahlung folgte (Abb. 2). Ihre Hypothese scheint damit grundsätzlich in der Lage, die beobachteten Klimaschwankungen in der Vergangenheit zu erklären. Trotzdem steht die Arbeit der Dänen auf wackeligen Beinen, da sich ihre Datenanalyse auf ein sehr kleines Zeitfenster von 15 Jahren beschränkt. Um die Hypothese zu erhärten, bräuchte man weitere Daten zur kosmischen Strahlung und zum Klima der letzten Jahrhunderte und Jahrtausende. Die EAWAG fand zusätzliche Informationen im Eisbohrkern aus Grönland.

Schwächere kosmische Strahlung in den letzten 300 Jahren

Betrachtet man die letzten 300 Jahre, sieht man, dass die kosmische Strahlung generell abgenommen hat. Dies weiss man einerseits aus direkten Messungen der kosmischen Strahlung durch Neutronenmonitore, die seit den 1950er Jahren in Betrieb sind; andererseits dienen Radionuklide wie Beryllium-10 (^{10}Be) und Chlor-36 (^{36}Cl), die im Grönlandeis abgelagert sind, als indirekte Parameter zur Rekonstruktion der vergangenen kosmischen Strahlung. Der Rückgang der kosmischen Strahlung ist wahrscheinlich auf eine zunehmende Sonnenaktivität zurückzuführen (siehe Abb. 2 und 3, S. 9). Nach der dänischen Hypothese würde

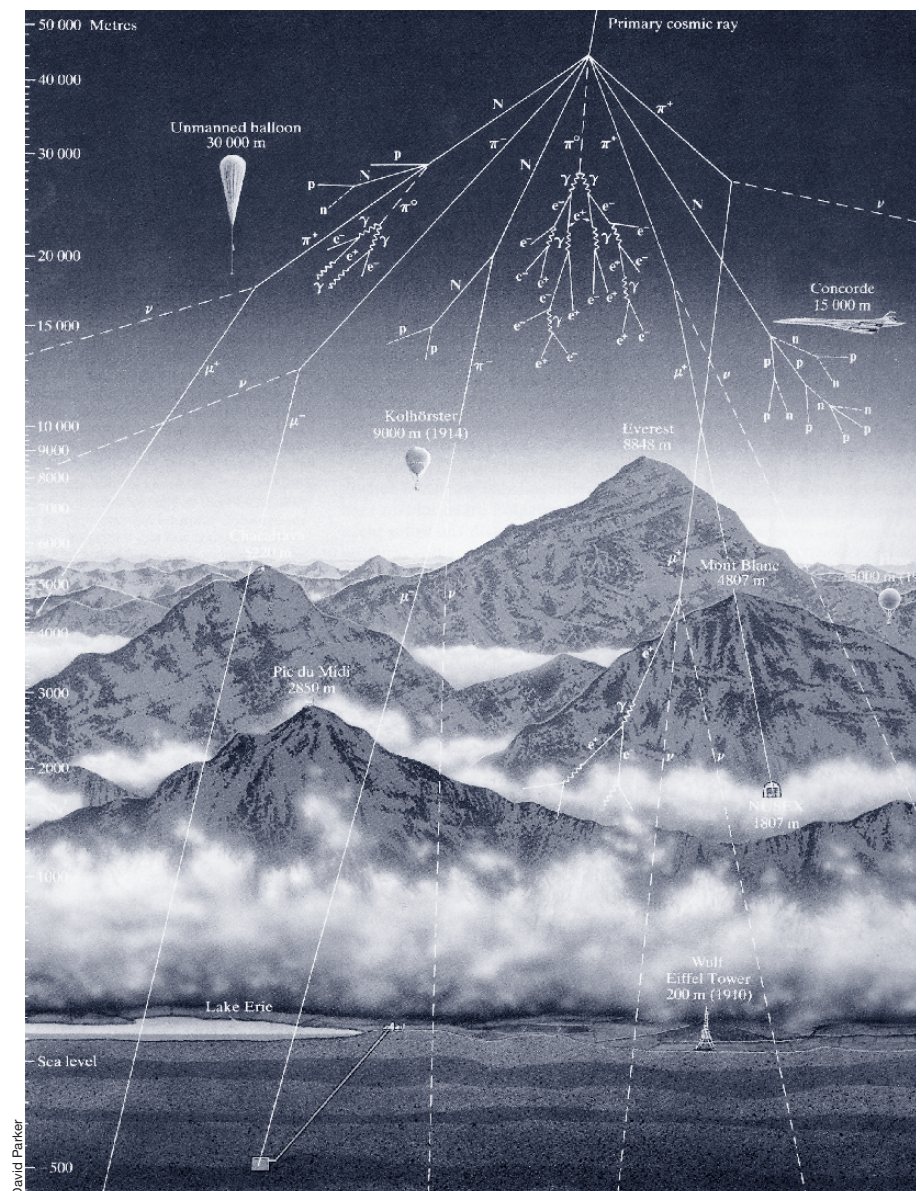


Abb. 3: Die kosmische Strahlung dringt mit hoher Energie vom Weltall kommend in die Atmosphäre ein und trifft auf die Atome der Luft. Dabei kommt es zur Bildung von Sekundärteilchen, die ihrerseits wieder mit Luftatomen zusammenstoßen und diese Atome in Bruchstücke spalten, was zur Bildung von kosmogenen Radionukliden führt. Gleichzeitig ionisieren die Primär- und Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung die Luft, sodass – gemäß der dänischen Hypothese – mehr Wolken gebildet werden. Die Abbildung ist eine Montage. Sie zeigt an, in welchem Höhenbereich der Atmosphäre sich die einzelnen Vorgänge abspielen.

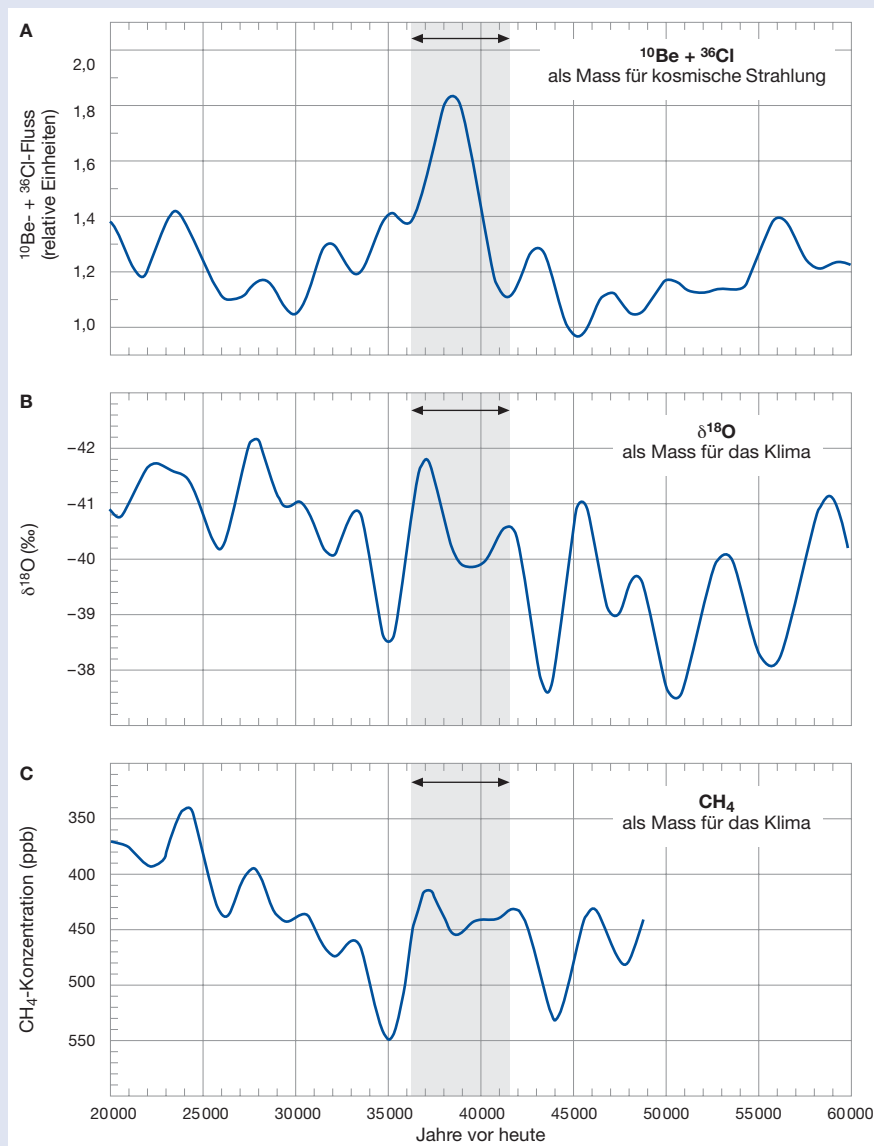


Abb. 4: Vergleich der kombinierten ^{10}Be - und ^{36}Cl -Daten (A) mit den beiden Klimaparametern $\delta^{18}\text{O}$ (B) und CH_4 (C) im GRIP-Eisbohrkern. Als Folge einer Abschwächung des Erdmagnetfeldes um 40 000 Jahre vor heute (grauer Bereich) steigt die Intensität der kosmischen Strahlung an und es wird mehr ^{10}Be und ^{36}Cl gebildet. Im Widerspruch zur dänischen Hypothese zeigen beide Klimaparameter jedoch keinen Hinweis auf eine entsprechende Klimaabkühlung. Die errechneten Korrelationskoeffizienten gehen gegen null. ppb = parts per billion = Teile auf eine Milliarde.

man für diese Periode mit schwächer werdender kosmischer Strahlung eine abnehmende Bewölkung und damit eine Klimaerwärmung erwarten. Bis hier hin sieht es also gut aus für die Wolkenhypothese.

Starke kosmische Strahlung vor 40 000 Jahren

Geht man noch weiter in die Vergangenheit zurück, ändert sich die Situation jedoch. Man findet nämlich vor ca. 40 000 Jahren eine etwa 3000 Jahre umfassende Zeitspanne, in der die kosmische Strahlung relativ stark war. Damals verlor die Erde plötzlich ihren Schutzschild und die kosmische Strahlung drang mit deutlich erhöhter Intensität in die Erdatmosphäre ein. Die Ursache lag im Erdmagnetfeld, dessen Intensität zu jener Zeit fast auf null abgesunken war und

nur noch ca. 10% des heutigen Wertes betrug. Trifft die dänische Wolkenhypothese zu, müsste die globale Bewölkung in dieser Zeitspanne zugenommen haben und es sollte zu einer deutlichen Klimaabkühlung gekommen sein [3].

Wiederum liefert der Grönlandeisbohrkern sämtliche Informationen, um diese Hypothese zu überprüfen. Abb. 4A zeigt die kombinierten ^{10}Be - und ^{36}Cl -Daten, wobei ein Peak vor ca. 40 000 Jahren ins Auge springt. Dieser Radionuklid-Peak entspricht genau unseren Erwartungen, denn durch eine starke kosmische Strahlung wurden vermehrt Radionuklide produziert. Gleichzeitig wurden mit $\delta^{18}\text{O}$ und Methan zwei Klimaparameter im Eisbohrkern gemessen. Aufgrund der Wolkenhypothese sollte es damals deutlich kälter geworden sein, so dass

wir für diese Periode eine ebenso deutliche Abnahme von $\delta^{18}\text{O}$ und Methan erwarteten. Dies ist jedoch nicht der Fall (Abb. 4B und C). Die beiden Klimaparameter $\delta^{18}\text{O}$ und Methan zeigen zwar unter sich eine gute Übereinstimmung, passen aber nicht zum Verlauf der $^{10}\text{Be}/^{36}\text{Cl}$ -Kurve. Unsere Resultate sprechen also klar gegen die Wolkenhypothese. Da alle Parameter im gleichen Eisbohrkern gemessen wurden, ist dieses wichtige Resultat zudem unabhängig davon, wie gut der Eisbohrkern datiert ist.

Zu ambitionöse Interpretationen

In der Zwischenzeit sind weitere Unstimmigkeiten aufgetaucht, insbesondere bei der Analyse der neuesten Wolkendaten, die nicht mehr dem Verlauf der kosmischen Strahlung folgen. Momentan sieht es eher schlecht aus für die Wolkenhypothese, obwohl das letzte Wort noch nicht gesprochen ist. Es zeigt sich einmal mehr, dass das Klima zu komplex ist, um seine Änderungen mit einem einzigen einfachen Mechanismus zu erklären. Dagegen mehren sich die Hinweise, dass die Sonne vor 1970 sehr wohl eine zentrale Rolle gespielt hat, allerdings nicht über den Umweg der kosmischen Strahlung, sondern direkt durch Änderung ihrer Strahlungsintensität (s. Artikel vom M. Vonmoos, S. 8). Die starke Erwärmung der letzten 30 Jahre kann jedoch nicht durch die Sonne erklärt werden. Es deutet alles darauf hin, dass sie das Resultat des durch den Menschen verursachten Anstiegs der Treibhausgase ist. In wenigen Jahren werden wir es mit Sicherheit wissen, allerdings ohne die Möglichkeit, die Folgen zu verhindern.

Jürg Beer, Portrait siehe S. 5

- [1] Svensmark H., Friis-Christensen E. (1997): Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics* 59, 1225–1232.
- [2] Calder N. (1997): Die launische Sonne: Dr. Böttiger Verlags-GMBH, Wiesbaden.
- [3] Wagner G., Livingstone D.M., Masarik J., Muscheler R., Beer J. (2001): Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the Earth's climate. *Journal Geophysical Research* 106, 3381–3388.
- [4] Jones P.D., Parker D.E., Osborn T.J., Briffa K.R. (2001): Global and hemispheric temperature anomalies – land and marine instrumental records. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, USA.
- [5] Neftel A., Moor E., Oeschger H., Stauffer B. (1985): Evidence from polar cores for the increase in atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature* 315, 45–47.
- [6] Keeling C.D., Whorf T.P. (2003): Atmospheric CO_2 concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Made available online by C.D. Keeling.