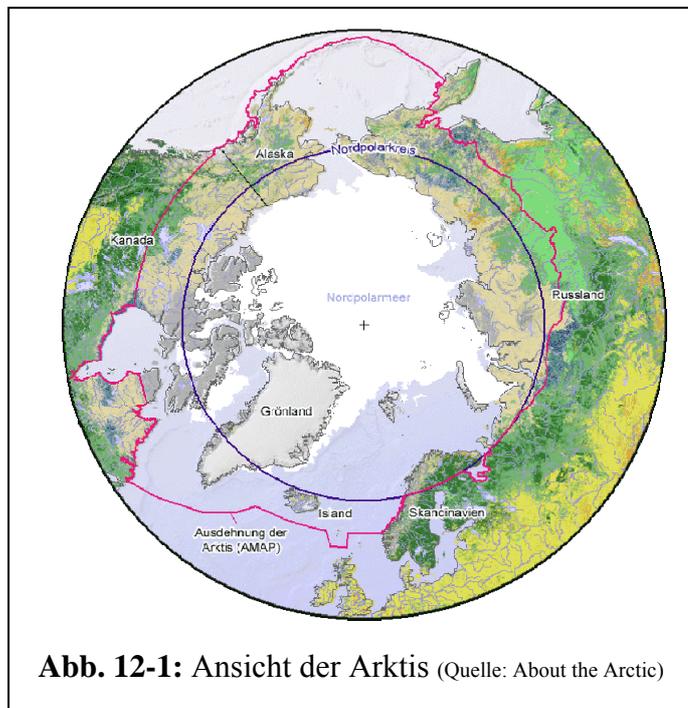


## 12. Rückkopplungseffekte

In seinem bereits zitierten Buch „**Der Klimawandel**“ (Rahmstorf/Schellnhuber, Verlag C. H. Beck, München, 6. Auflage, 2007, S.36, S.42ff, S.51ff) benennt Professor Rahmstorf nur positive bzw. verstärkende Rückkopplungen, die den Klimawandel zusätzlich beschleunigen. Dämpfende bzw. negative Rückkopplungen seien weit und breit nirgends zu entdecken. Eine positive Rückkopplung heißt in der Elektrotechnik auch Mitkopplung und eine Mitkopplung hat immer die Tendenz, ein System instabil werden zu lassen. Auf der anderen Seite wirken negative Rückkopplungen (bzw. Gegenkopplungen) stabilisierend auf ein System.

In Bezug auf die Klimasensitivität der CO<sub>2</sub>-Konzentration lässt sich sagen, dass sie exponentiell mit dem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration abnimmt. Nennenswerte Temperaturanstiege entstehen jeweils bei Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Dieses Verhalten nennt man Sättigung und ein gesättigtes System ist stabil in Bezug auf Erhöhung des zur Sättigung führenden Parameters.

Als positive Rückkopplungen werden Wasserdampf und Eis-Albedo genannt. Der Einfluss der Wolken als Mitkopplung gilt als unsicher, da eine verstärkte Wolkenbildung einen abkühlenden Effekt hervorrufen könnte. Wäre eine verstärkte Wolkenbildung damit ein Kandidat für eine Gegenkopplung?



Sehen wir uns zunächst den Eis-Albedoeffekt an. Es ist leicht einzusehen, dass Eis bzw. Schnee das Sonnenlicht stärker reflektieren als der Erdboden bzw. die Wasseroberfläche. Ist kein Eis oder Schnee mehr vorhanden, so wird mehr Sonnenlicht absorbiert und die mittlere Erdtemperatur wird steigen. Schnee und Eis folgen aber immer der Umgebungstemperatur. Es wird also zuerst kalt, weil im Winter die Sonneneinstrahlung sinkt und dann folgt der Schneefall. Infolge höherer Sonneneinstrahlung schmilzt der Schnee auch wieder im Frühling. Bei niedrigem Sonnenstand reicht die eingestrahlte Energie offensichtlich nicht aus, um den nennenswert Schnee zu schmelzen (obwohl der Schnee auch bei Frost durch Sonneneinstrahlung abnimmt). Der Energieeintrag durch Strahlung auf die Schneeflächen der Polregionen ist wohl global gesehen ziemlich gering. Professor Rahmstorf spricht vom Rückgang des arktischen Meer-Eises („**Der Klimawandel**“, Kapitel 3), während die Eisschicht der Antarktis vorerst stabil bleibt. Die „**Stuttgarter Nachrichten**“ Nummer 11/2002 berichteten, dass gegen den Trend sich die Antarktis immer mehr

## Der anthropogene Treibhauseffekt – Sciencefiction oder Realität?

abkühlt, was zum Rückgang der ohnehin spärlichen Tier- und Pflanzenwelt führt. Über ein großflächiges Abschmelzen der Antarktis muss man sich also „vorerst“ keine Sorgen machen. Konzentrieren wir uns also auf die Arktis und zu welchem zusätzlichen Energieeintrag ein völliger Schwund des Eises im schlimmsten Fall führen würde. Dieser Fall wird nicht eintreten, da auf Grund der Ekliptik in dieser Region über Monate die Polarnacht herrscht, in der die Sonne überhaupt nicht scheint. Daher wird in dieser Zeit immer eine Eis- bzw. Schneeschicht aufgebaut werden, die im Sommer erst wieder abgetaut werden müsste.

Für die Berechnung des Wärmeeintrags gehen wir vom Nordpolarkreis aus (siehe Abbildung 10.1). Seine Lage wird mit  $66^{\circ} 34'$  nördlicher Breite angegeben, was  $66,56^{\circ}$  entspricht. Damit lässt sich die Fläche innerhalb des Polarkreises nach der Formel für den Oberflächeninhalt eines Kugelsegmentes  $A_s$  bestimmen:

$$A_s(\alpha) = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (12.1)$$

Dabei ist  $r$  der Kugelradius und  $\alpha$  der Öffnungswinkel des Kugelsegmentes. Wenn  $0^{\circ}$  dem Äquator entspricht und  $90^{\circ}$  dem Pol, dann gilt für  $\alpha/2$  für den Polarkreis:

$$\frac{\alpha}{2} = 90^{\circ} - 66,56^{\circ} = 23,43^{\circ} \quad (12.2)$$

Mit dem Erdradius von 6371km ergibt sich nach (12.1) und (12.2) eine Fläche der Polarregion  $A_{PK}$  von:

$$A_{PK} = 2 \cdot \pi \cdot (6371km)^2 \cdot (1 - \cos(23,43^{\circ})) = 21,03 \cdot 10^6 km^2 \quad (12.3)$$

Für den Energieeintrag der Arktis muss die Projektionsfläche auf einen Kreis mit dem Erdradius ermittelt werden. Das kann mit der Formel zur Flächenberechnung eines Kreissegments geschehen:

$$A_{SG} = r^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{360^{\circ}} - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (12.4)$$

Für den Polarkreis ergibt das mit dem Öffnungswinkel  $\alpha$  und dem Erdradius  $r_E$  eine projizierte Fläche  $A'_{PK}$  von:

$$A'_{PK} = (6371km)^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2 \cdot 23,43^{\circ}}{360^{\circ}} - \sin(23,43^{\circ}) \cdot \cos(23,43^{\circ})\right) = 1,7895 \cdot 10^6 km^2 \quad (12.5)$$

Bezogen auf die gesamte Projektionsfläche der Erde ergibt das prozentual:

$$\frac{A'_{PK}}{\pi \cdot r_E^2} = \frac{1,7894 \cdot 10^6 km^2}{\pi \cdot (6371km)^2} = 0,014 \equiv 1,4\% \quad (12.6)$$

Außerdem muss noch beachtet werden, dass die vereiste Fläche der Arktis im Mittel nur 13,2 Millionen  $km^2$  beträgt (siehe auch Abbildung 12.1). Damit reduziert sich die betroffene Fläche unter Einbeziehung von (12.3) auf:

$$0,014 \cdot \frac{13,2 \cdot 10^6 km^2}{21,03 \cdot 10^6 km^2} = 0,0088 \equiv 0,88\% \quad (12.7)$$

Der mittlere Reflektionsgrad der Erde berechnet sich nach Abbildung 1-1 aus dem Verhältnis der reflektierten zur insgesamt eingestrahnten Leistung. Für die Erde gilt daher:

$$\bar{\rho} = \frac{30 \frac{W}{m^2}}{198 \frac{W}{m^2}} = 0,1515 \quad (12.8)$$

Für den Reflektionsgrad von Schnee wird ein Wert von 0,7 angegeben. Damit lässt sich ein Reflektionsgrad der Erde mit einer eisfreien Arktis folgendermaßen berechnen:

$$\bar{\rho} = 0,0088 \cdot 0,7 + (1 - 0,0088) \cdot \rho' \quad \rightarrow \quad \rho' = \frac{0,1515 - 0,0062}{0,9912} = 0,1466 \quad (12.9)$$

Bezogen auf die Gesamteinstrahlung von  $198 \text{ W/m}^2$  ergibt das eine reflektierte Leistung von:

$$198 \frac{W}{m^2} \cdot 0,1466 = 29 \frac{W}{m^2} \quad (12.10)$$

Damit senkt sich die am Boden reflektierte Leistung um nur  $1 \text{ W/m}^2$  ab. Der neue verringerte Albedo berechnet sich dann analog (2.8) zu:

$$A = \frac{107 \frac{W}{m^2} - 1 \frac{W}{m^2}}{342 \frac{W}{m^2}} = 0,31 \quad (12.11)$$

Für die Strahlungsgleichgewichtstemperatur der Erde  $T_E$  ergibt sich analog (2.9):

$$T_E = \sqrt[4]{342 \frac{W}{m^2} \cdot \frac{1 - 0,31}{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}}} = 253,999 \text{ K} \cong -19^\circ \text{C} \quad (12.12)$$

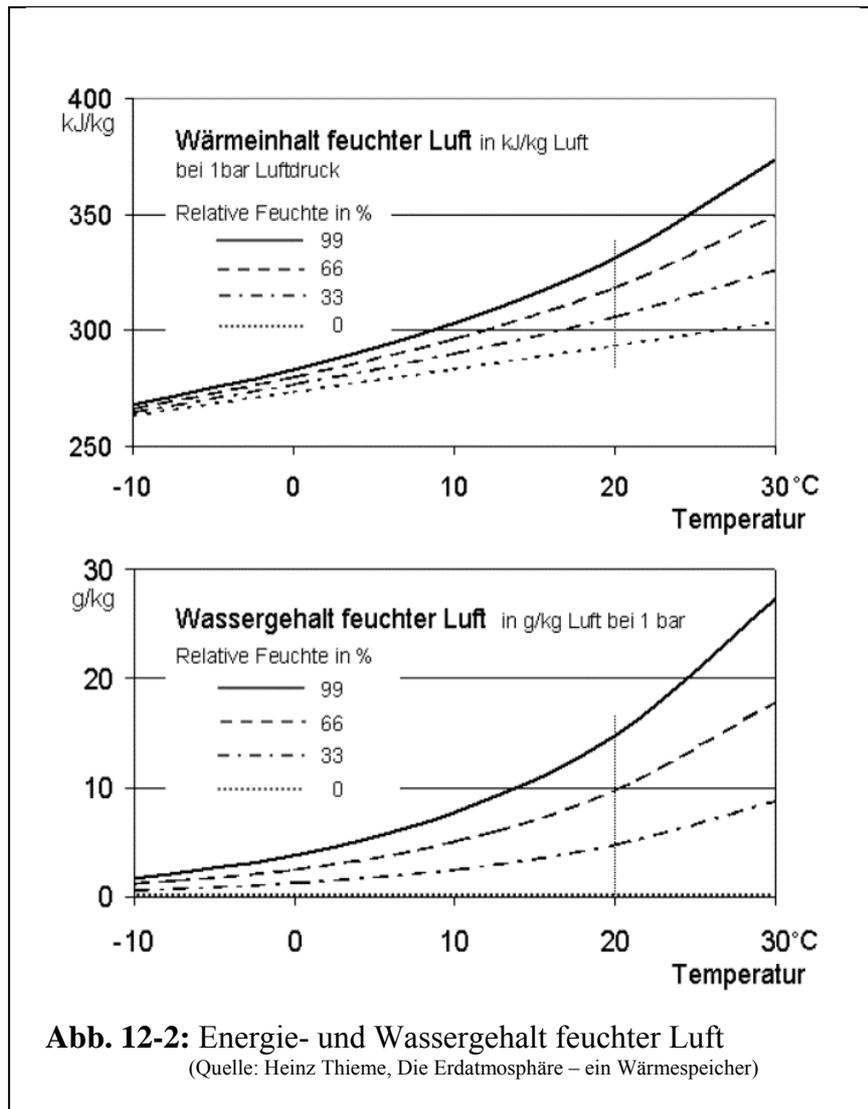
Das heißt die Strahlungsgleichgewichtstemperatur der Erde ändert sich durch das hypothetisch vollständige Abschmelzen des arktischen Eises praktisch nicht. Schnee und Eis treten als Folge eines niedrigen Sonnenstandes ein. Der Auftreffwinkel der Sonnenstrahlen wird dabei so spitz, dass nur sehr wenig Energie pro  $\text{m}^2$  absorbiert werden kann. Daher ist der positive Rückkopplungseffekt durch das Abschmelzen der Eis- bzw. Schneeschichten auch nur gering und braucht uns ebenfalls nicht zu beunruhigen. Dass der verstärkende Effekt der Eis- bzw. Schneeschicht nur gering sein kann, beweist jedes Jahr der anbrechende Frühling, der trotz Reflektion durch seine wärmenden Sonnenstrahlen den Schnee schnell zum Schmelzen bringt.

So bleibt als letztes noch das Argument des Anstiegs der Wasserdampfkonzentration in der sich erwärmenden Atmosphäre. Es ist zweifellos so, dass warme Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann als kalte Luft. Wir kennen das Phänomen durch starke Verdunstung bei warmem Wetter und durch die Taubildung (Kondensation) in kühlen Nächten.

Professor Rahmstorf geht davon aus, dass Wasserdampf im Infrarotabstrahlungsbereich der Erde aktiv ist und daher eine  $\text{H}_2\text{O}$ -Konzentrationserhöhung den Treibhauseffekt verstärken muss. Dazu ist erst einmal zu sagen, dass Wasserdampf immer ein Gemisch aus gasförmigem Wasser und

## Der anthropogene Treibhauseffekt – Sciencefiction oder Realität?

Wasser in feinsten Tröpfchenform (Dunst) ist. Wasser in flüssigem Zustand beeinflusst aber immer auch die Sonneneinstrahlung, so dass bei Konzentrationserhöhung auch eine Erhöhung des Albedos eintreten muss. Weil die Wassermoleküle eine nichtlineare Struktur besitzen, haben sie einen permanenten Dipolcharakter. Daher ist schon die Rotation der Moleküle infrarotaktiv. Nach Abbildung 9-1 gibt es Überlappungen mit dem 15 $\mu\text{m}$ -Band des  $\text{CO}_2$ , so dass sich  $\text{H}_2\text{O}$ -Konzentrationserhöhungen nicht im vollen Umfang auswirken können. Interessant sind die Rotations-/Schwingungsspektren im 3 $\mu\text{m}$ - und 6 $\mu\text{m}$ -Band. Nach Abbildung 5-9 liegt das 6 $\mu\text{m}$ -Band im Abstrahlungsbereich der Erde und das 3 $\mu\text{m}$ -Band im Abstrahlungsbereich der Sonne, so dass hier ein gegenläufiger Effekt auftritt. Der Wasserdampf absorbiert sowohl das eintreffende Sonnenlicht, als auch die von der Erde abgegebene Wärmestrahlung. Es wird ein Ausgleich zumindest wahrscheinlich. Damit wirkt Wasserdampf eher stabilisierend auf das Klima.



Wichtig ist außerdem, dass der Wärmeinhalt der Luft nicht nur von der Temperatur und vom Luftdruck abhängt, sondern auch wesentlich von der Luftfeuchtigkeit beeinflusst wird. Dabei wird der Wärmeinhalt üblicherweise auf die Masse von 1 kg bezogen. In Abbildung 12-2 sind die Verhältnisse bei konstantem Luftdruck von 1 bar dargestellt. Bei trockener Luft steigt der Wärmeinhalt um 1 kJ/kg pro Temperaturanstieg um je ein Grad. Bei feuchter Luft dagegen wird der Energieinhalt in erheblichem Maß durch die latente Verdampfungs- bzw. Kondensationswärme des enthaltenen Wasserdampfes bestimmt. Beispielsweise ist bei +20°C (und 1 bar Druck) der Energieinhalt der Luft bei 99% relativer Luftfeuchtigkeit um etwa 13% (bzw. 37,5 kJ/kg) höher als der Energiegehalt trockener Luft bei gleicher Temperatur. Trockene Luft bei 26,4°C hat denselben

## Der anthropogene Treibhauseffekt – Sciencefiction oder Realität?

Wärmeinhalt (300kJ/kg) wie feuchte Luft bei 99% relativer Feuchte und 8,8°C. Den Unterschied macht einzig und allein der Gehalt an Wasserdampf aus. Trockene Luft enthält kein Wasser, feuchte Luft enthält dagegen bei 99% relativer Feuchte und einer Temperatur von 8.8°C bereits einen Wassergehalt von 7,1 Gramm Wasser je kg Luft. Daher wird sich eine erhöhte Luftfeuchtigkeit auch dämpfend auf eine Temperaturerhöhung auswirken. Auch hier sieht man einen eher die Temperatur stabilisierenden Effekt des Wasserdampfes.

Auf der anderen Seite ist es durchaus wahrscheinlich, dass eine erhöhte Wasserdampfkonzentration in der Atmosphäre zu einer erhöhten Wolkenbildung und damit zu einer erhöhten Albedo führt. Die unten stehenden Ausführungen zum klimatischen Einfluss der Wolken folgen dem sehr lesenswerten Artikel „**Die Erdatmosphäre – ein Wärmespeicher**“ von Dipl.-Ing. Heinz Thieme.

Energiebilanzen wie in Abbildung 1-1 enthalten erhebliche Unsicherheiten durch den Anteil der wolkenbedingten Reflexion der Sonneneinstrahlung von ca. 20%. Zuverlässige Daten über die gesamte Bewölkung der Erde gibt es derzeit nicht. Außerdem entspricht die energetische Wirksamkeit der Reflexion durch die Wolken dem Sonnenstand und ist damit zwischen Äquator und Polen recht unterschiedlich.

Bei einer geschlossenen Wolkendecke kommen ungefähr nur noch 50% der oberhalb der Wolkendecke vorhandenen Sonneneinstrahlung am Erdboden an. Eine Veränderung der Bewölkung hat deshalb schon durch größere oder geringere Reflexionen gravierende Wirkungen auf die mögliche Strahlungsabsorption der Erdoberfläche. Nehmen wir an, dass der größte Teil der kurzwelligigen Sonnenstrahlung (67W/m<sup>2</sup> aus Abbildung 1-1) bereits über der Wolkendecke durch die Ozonschicht absorbiert worden ist. Dann beträgt die auf die Wolken eintreffende Intensität  $I_E$ :

$$I_E = 342 \frac{W}{m^2} - 67 \frac{W}{m^2} = 275 \frac{W}{m^2} \quad (12.13)$$

Bei nicht geschlossener Wolkendecke dringt die Sonnenstrahlung durch die Lücken bis zur Erdoberfläche durch, während sie durch die Wolken um 50% gedämpft wird. Bezeichnen wir den Bewölkungsgrad mit  $p_w$ , so lässt sich für die Intensität am Erdboden  $I_A$  folgende Formel aufstellen:

$$I_A = I_E \cdot \left( (1 - p_w) + \frac{p_w}{2} \right) = I_E \cdot \left( 1 - \frac{p_w}{2} \right) \quad (12.14)$$

Da nach Abbildung 1-1  $I_A=198W/m^2$  die Erdoberfläche erreichen (wovon nochmals 30W/m<sup>2</sup> am Boden reflektiert werden), lässt sich nach (12.13) und (12.14) der mittlere Bewölkungsgrad abschätzen.

$$198 \frac{W}{m^2} = 275 \frac{W}{m^2} \cdot \left( 1 - \frac{p_w}{2} \right) \quad \rightarrow \quad p_w = 0,56 \quad (12.15)$$

Wenn sich dieser Bewölkungsgrad von 56% um nur  $\pm 6\%$  ändert, würde, sofern sich keine zusätzlichen Wirkungen ergeben, die an der Erdoberfläche ankommenden Sonneneinstrahlung im Bereich von 190 bis 206W/m<sup>2</sup> liegen. Eine kleine Veränderung in der Wolkenbedeckung hat also eine viel größere Wirkung auf den Energieeintrag der Erde als die Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration mit 1,9W/m<sup>2</sup> und das Abschmelzen des arktischen Eises mit 1W/m<sup>2</sup> zusammen. Damit kommt dem Bewölkungsgrad der wesentlichste Anteil an klimatischen Veränderungen zu.

Der Vergleich der beiden Diagramme aus Abbildung 10-7 zeigt, dass bei geschlossener Wolkendecke die Intensität und damit die Leistung der thermischen Abstrahlung ins All lediglich etwa 50% jener bei klarem Himmel entspricht. Global gesehen beziffert Dipl.-Ing. Heinz Thieme

die durch die geschlossene Wolkendecke verursachte Minderung der thermischen Abstrahlungsleistung des Systems Erde/Atmosphäre auf etwa  $120\text{W/m}^2$ . Diese Wirkung beruht sowohl auf der Unterbindung der direkten thermischen Strahlung der Erdoberfläche in Richtung All als auch in der Schaffung eines anderen, jetzt in der Höhe und bei den dort geringeren Temperaturen liegenden Emissionsniveaus der thermischen Strahlung. Dieses Ausmaß an Beeinflussung der thermischen Abstrahlung aus dem System Erde/Atmosphäre in das All allein durch Wolken ist so gewichtig, dass damit alle übrigen behaupteten Beeinflussungen durch einen Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration nahezu bedeutungslos erscheinen. Die Rolle der Bewölkung ist vor allem deswegen so extrem, weil es keinen beständigen Grad der Bewölkung gibt. Vielmehr sind nach Meinung von Dipl.-Ing. Heinz Thieme in längerfristiger Sicht nennenswerte Unterschiede bei der mittleren Bewölkung der Erde zu verzeichnen.

Da auch die positiven Rückkopplungen nicht den erwünschten hohen Temperaturanstieg aus dem Hut zaubern können, betrachtet man das Klima der Erde zunehmend als nichtlineares System. Kleine Änderungen sollen durch Umkippen zu neuen stabilen Zuständen führen. Auslöser sind die so genannten Kippelemente. Aber an diesem Punkt hat man sich schon weit vom ursprünglichen Versuch entfernt, den Klimawandel nach „**Chemie und Umwelt**“ (Reinhardt/Heintz, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1990) mit dem Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration erklären zu wollen. Die Modelle werden immer spekulativer. Man glaubt das Eiszeitklima gut zu kennen und rechnet tausende Computersimulationen durch, um irgendeine Konstellation an Umwelteinflüssen zu erkennen, die zum schnellen (?) Kippen des Klimas geführt haben könnte. Den tatsächlichen Beweis kann keiner liefern, während die rein physikalischen Wirkungen eher zu vernachlässigen sind.

Grundlage für die Computersimulationen ist die Atmosphärenzusammensetzung während der Eiszeit. Zu diesem Zweck werden in Grönland und in der Antarktis Bohrungen durch das Eis bis zum Felsengrund getrieben und die in den Bohrkernen aus Eis enthaltenen Luftbläschen ausgewertet. Durch das Greenland Icecore Project wurde beispielsweise ein 3028m langer Eiskern gewonnen, bevor das Grundgestein erreicht wurde. Dieser Kern soll eine Zeitdauer von 250000 Jahren repräsentieren, was ca. 1,2cm Eisdecke pro Jahr entspricht. In den obersten Bereichen lassen sich ca. 14500 deutliche Schichten unterscheiden, wobei jede dieser Schichten ähnlich den Jahresringen bei Bäumen ein Kalenderjahr repräsentieren soll. Wobei man natürlich sofort einwenden kann, dass auch mehrere Schneefälle pro Jahr denkbar und auch wahrscheinlich sind. Unterhalb einer bestimmten Höhe hören die Schichtungen auf. Es wird angenommen, dass durch den Druck der darüber liegenden Eismassen das Eis zerquetscht wird und zur Seite wegfließt. Anhand von Modellen wird das Fließverhalten nachgebildet und so aus der Dicke das Alter bestimmt. Für die ältesten 10000 Jahre wird auf diese Weise 1mm pro Jahr angegeben. Was von solcher Art von Altersbestimmung zu halten ist, illustriert Hans-Joachim Zillmer in seinem lesenswerten Buch „**Irrtümer der Erdgeschichte**“ (Langen Müller in der F. A. Herbig Verlagsbuchhandlung GmbH, München, 2. Auflage, 2002, Kapitel 6).

Am 15. Juli 1942 mussten sechs Jagdflieger vom Typ P38 und zwei Bomber vom Typ B17 während der Überführung zweier Pionierstaffeln von Kanada nach Schottland an der grönländischen Küste auf festem Eis notlanden. Die Besatzungen wurden gerettet, aber die Maschinen mussten aufgegeben werden. Im September 1989 – 47 Jahre nach der Notlandung – sollten ein Jagdflugzeug und ein Bomber aus dem Eis geschmolzen werden. Spezialisten hatten ausgerechnet, dass die Maschinen nach dieser Zeitspanne 12m tief im Eis eingefroren sein müssten. Ihr Hinweis, dass die Maschinen wegen der starken Wanderung des Eises schwer zu finden sein müssten, erwies sich als falsch. Sie befanden sich noch exakt auf den Koordinaten ihrer Notlandung. Auch die Vermutung der völligen Zerquetschung durch die aufliegenden Eismassen erwies sich als falsch. Lediglich die Scheiben der Kabinen waren zerbrochen, während die filigranen Verstrebenungen und die Flügel noch völlig intakt waren. Die größte Überraschung war jedoch die Dicke der Eisschicht über den Maschinen. Anstatt der berechneten 12m stieß man auf 54m massives Eis und auf 24m sehr harten

## Der anthropogene Treibhauseffekt – Sciencefiction oder Realität?

Firn. Die insgesamt 78m Eis sind damit ca. sechsmal so viel, wie erwartet. Da das Eis wider Erwarten nicht komprimiert war, sind die gesamte Altersbestimmung und auch die daraus abgeleitete Klimarekonstruktion völlig ohne Aussagekraft. Über den Flugzeugen hatte sich im Schnitt eine Eisschicht von ca. 1,65m pro Jahr gebildet. Nach der Alterstheorie der Eisbohrkerne müssten diese 78m um den Faktor 1650 zusammengedrückt worden sein. Aber das Eis hatte die Flugzeuge in 80m Tiefe noch nicht einmal leicht zusammengedrückt. Da das Fließen des Eises nicht bestätigt werden konnte, ist auch nicht klar, warum nach 14500 Schichten keine Bänderung mehr zu erkennen ist. Es ist somit durchaus möglich, dass der gesamte Restpanzer während nur einer heftigen Schneeperiode entstanden ist.

Teilt man jedenfalls den 3028m langen Kern durch die gefundenen 1,65m pro Jahr, so kommt man nur auf ein Alter von 1835 Jahren. Auch wenn diese Rechnung nicht genau ist, so zeigt es doch, dass die Annahmen der Klimamodellierung mit großer Wahrscheinlichkeit falsch sind. Somit erweist sich auch der Versuch der Kippunktberechnung als Grundlage der Horrorszenarien als Holzweg.

Alle Computersimulationen gehen von langsamen Veränderungen in der Erdgeschichte aus. Wenn es aber große Veränderungen in kurzer Zeit gab, wie z.B. eine globale Sintflut und das Auseinanderbrechen und anschließend schnelle Auseinanderdriften der Kontinente zu Lebzeiten des biblischen Peleg, dann müssen auch aus diesem Grund die Simulationen in die Irre führen. Der bereits zitierte Hans-Joachim Zillmer hat in seinen Büchern „**Irrtümer der Erdgeschichte**“ (Langen Müller in der F. A. Herbig Verlagsbuchhandlung GmbH, München, 2. Auflage, 2002) und „**Die Evolutionslüge**“ (Langen Müller in der F. A. Herbig Verlagsbuchhandlung GmbH, München, 2005) schlagende Beweise für Unhaltbarkeit der langen Zeiträume in der Erdgeschichte und der darauf beruhenden Evolutionstheorie zusammengestellt. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass die klimatischen Änderungen im Laufe der kurzen Erdgeschichte durch Katastrophen herbeigeführt wurden und nicht durch Veränderungen im CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre.