

## Globaler Klimawandel – Aktueller Stand der wissenschaftlichen Diskussion

*Dr. Thomas Bruckner, Institut für Energietechnik, TU Berlin  
Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung*

Im Jahre 2001 wurde der letzte große, den internationalen Stand der Klima- und Klimafolgenforschung auf mehreren tausend Seiten zusammenfassende Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlicht [1]. In der Zwischenzeit hat die wissenschaftliche Analyse des globalen Klimawandels und seiner potenziellen Auswirkungen große Fortschritte erzielt. Im Folgenden sollen diese Fortschritte skizziert, der Ernst der Bedrohungslage veranschaulicht und die Notwendigkeit einer langfristig angelegten, umfassenden Klimaschutzstrategie verdeutlicht werden.

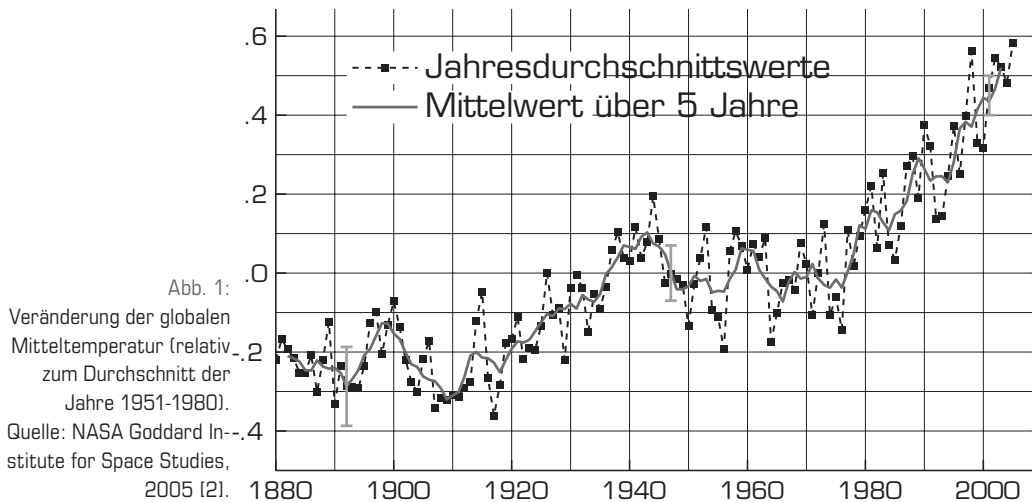
### Der Klimawandel findet bereits statt

Im Jahre 1986 hat „Der Spiegel“ mit einer Titelgeschichte zum Thema „Klimakatastrophe“ die breite Öffentlichkeit zum ersten Mal auf den anthropogenen Treibhauseffekt aufmerksam gemacht. Das Titelbild, das den Kölner Dom meterhoch in den Fluten stehend zeigte, wurde im Nachhinein von vielen als übertrieben und unseriös kritisiert. In der wissenschaftlichen Diskussion und dem darauf aufbauenden internationalen klimapolitischen Prozess wurde deshalb der Begriff „Klimakatastrophe“ in der Folgezeit vermieden und durch den neutraleren Begriff des „Globalen Klimawandels“ ersetzt.

Heute – 20 Jahre danach – wird deutlich, wie richtig diese Entscheidung war. Denn es geht in der Tat nicht nur darum, die Klimainstabilitäten (die tatsächlich „climate catastrophes“, wie z.B. den Zusammenbruch des Nordatlantikstromes, das Abbrechen der Westantarktischen Eisplatte oder das Abschmelzen des Grönlandeises) zu verhindern. Wichtig ist es darüber hinaus, sich auch ernsthafte Gedanken über die Klimafolgen zu machen, die graduell anwachsen und dabei kein Schwellenwertverhalten zeigen. Während die Klimainstabilitäten mit hoher Wahrscheinlichkeit durch rechtzeitige und umfassende Treibhausgasemissionsminderungsmaßnahmen noch verhindert werden können, gilt dies für den Klimawandel an sich nicht mehr. Er findet bereits statt und erste Auswirkungen sind nicht mehr zu übersehen.

In den letzten 100 Jahren hat die globale Mitteltemperatur um 0,8°C zugenommen [2]; der Temperaturanstieg in Europa betrug sogar 0,95°C [3]. Das vergangene Jahr war das wärmste seit Beginn der regelmäßigen Temperaturaufzeichnungen, dicht gefolgt von 1998,

2002, 2003 und 2004 (vgl. Abb.1). Auswertungen indirekter Temperaturdaten (sog. Proxy-Daten) legen nahe, dass es sich bei 2005 sogar um das wärmste Jahr seit einigen tausend Jahren handelte. Und die globale Mitteltemperatur steigt – für klimatologische Verhältnisse – rasend schnell an. Mit einem Wert von  $0,2^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  liegt sie heute bereits deutlich über dem, was die Klima-Enquete-Kommissionen des Deutschen Bundestages Anfang der 90er Jahre als einzuhaltenden Vorsorgegrenzwert vorgeschlagen hatten ( $0,1^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$ ).



Aber nicht nur das Klima hat sich nachweislich verändert. Auch die Folgen des Klimawandels treten mittlerweile deutlich zu Tage. So hat sich zum Beispiel die Ausdehnung des arktischen Meereises in den vergangenen 25 Jahren um etwa 20% verringert [4]; die Eisdicke nahm in den letzten 40 Jahren sogar um 40% ab [5]. Auch der dramatische Rückzug der Alpengletscher ist nicht mehr zu übersehen: Bereits im Jahr 1980 hatten sie mehr als  $1/3$  ihrer Fläche und die Hälfte ihrer Masse verloren, bis zum Jahr 2000 schmolzen nochmals 20-30% des verbliebenen Restes und allein im Hitzejahr 2003 gingen weitere 10% verloren [6]. Im Hinblick auf die Veränderung der Niederschläge zeigen sich – in Übereinstimmung mit dem, was Klimamodellrechnungen erwarten lassen – deutliche regionale Unterschiede. In Nordeuropa hat die Niederschlagsmenge in den letzten 100 Jahren um bis zu 40% zugenommen, während sie im ohnehin schon trockenen Südeuropa gleichzeitig um bis zu 20% abnahm [3].

## **Überschwemmungen, Dürren, Wirbelstürme - die Symptome richtig interpretieren**

Die Frage, inwieweit es sich bei den ungewöhnlich starken Überschwemmungen, Hitzewellen und Wirbelstürmen der letzten Jahre um Folgen des globalen Klimawandels handelt, muss differenziert angegangen werden. Extremereignisse hat es immer schon gegeben. Sie sind Ausdruck der Variabilität des Klimas und können – zumindest als einzelnes Ereignis betrachtet – nicht ursächlich dem globalen Klimawandel zugeordnet werden. Es lässt sich aber prüfen, welche der Extremwetterlagen zu denen gehören, die aufgrund von Klimamodellrechnungen bei einer Klimaveränderung regionalspezifisch gehäuft auftreten sollten.

### **Die Hochwasserkatastrophe in Mitteleuropa 2002**

Die Elbeflut im Sommer des Jahres 2002 (mit einem Pegelstand der Elbe in Dresden von 9,40 m im Vergleich zu einem normalen Stand von 2,30 m) hat 25600 Gebäude in Mitleidenschaft gezogen, einen volkswirtschaftlichen Schaden von 9,2 Mrd € verursacht und europaweit zu mehr als 200 Todesfällen geführt [6]. Im Zusammenhang mit dem globalen Klimawandel ist aufgrund der Temperaturerhöhung mit einer stärkeren Verdunstung und damit (zumindest global gesehen) auch mit einer erhöhten Niederschlagsmenge zu rechnen – verbunden mit einer Intensivierung und Häufung extremer Niederschlagsereignisse.

So gesehen passt die Elbeflut 2002 zu dem, was der globale Klimawandel erwarten lässt. Andererseits zeigen regionalspezifische Klimamodellrechnungen in Übereinstimmung mit der beobachteten Tendenz, dass speziell für das betroffene Gebiet zukünftig eher mit einer Zunahme der Winterniederschläge und einer Abnahme der Niederschläge im Sommer zu rechnen ist. Eine endgültige Einordnung dieser Flut fällt somit schwer. Eindeutig gezeigt aber hat sie, welche unerwartet hohe Schäden klimatische Extremereignisse gerade in hoch-industrialisierten Staaten zu verursachen vermögen.

### **Der Extremsommer 2003**

Die Bundesrepublik Deutschland gehört zusammen mit anderen europäischen Staaten zu den Vorreitern des internationalen Klimaschutzes. Dieses Engagement wurde in der Vergangenheit vorwiegend von der Sorge getragen, die Folgen des globalen Klimawandels könnten vor allem die Entwicklungsländer treffen und zumindest einige davon - z.B. die tiefliegenden Inselstaaten - existentiell bedrohen. Nachdem das eingangs erwähnte Bild des in den Fluten versinkenden Kölner Doms von der Wissenschaft als weitgehend übertrieben zurückgewiesen wurde, taten sich manche jedoch schwer damit, eine reale klimawandelbedingte Gefahr für die BRD zu erkennen. Mediterrane Verhältnisse vor Augen hofften nicht wenige, dass der Klimawandel zumindest für Deutschland überwiegend positive Auswirkungen haben könnte.

Wie trügerisch eine solche Vorstellung sein kann hat der Extrem-sommer 2003 gezeigt. Europaweit lagen die Sommertemperaturen im Jahr 2003 erheblich über dem langjährigen Durchschnitt. In der Schweiz zum Beispiel wich die mittlere Sommertemperatur um mehr als fünf Standardabweichungen vom Mittelwert der historisch beobachteten Temperaturverteilung ab. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der gemessenen Sommertemperaturen war so klein, dass die durchschnittliche Wiederkehrzeit für ein solches Ereignis auf mehrere Millionen Jahre beziffert wurde [7]. Berücksichtigt man in den entsprechenden Rechnungen aber den bereits beobachtbaren, klimawandelbedingten Anstieg des Mittelwertes, so steigt die Wiederkehrzeit auf 9.000 Jahre an. Unter Zugrundelegung einer Verschiebung des Mittelwertes und einer Zunahme der Breite der Temperaturverteilung wie sie nach Klimamodellrechnungen unter Business-as-usual-Annahmen für das Ende dieses Jahrhunderts zu erwarten sind, steigt die Wiederkehrzeit auf zwei Jahre an. Unter diesen Bedingungen wären die Verhältnisse des Extremsommers 2003 somit zukünftig nicht mehr die Ausnahme, sondern nahezu die Regel.

Europaweit starben im Sommer 2003 je nach Schätzungen 22.000 bis 35.000 mehr Menschen als in Jahren mit normalen Sommertemperaturen. In Deutschland waren nach vorsichtigen Schätzungen des Deutschen Wetterdienstes 7.000 Hitzetote zu beklagen. Gemessen an der Zahl der Todesopfer stellte die Hitzewelle 2003 nach Einschätzung des Deutschen Wetterdienstes die größte europäische Naturkatastrophe der vergangenen 500 Jahre dar [6]. Die Ernteverluste und die Kosten der Waldbrände summierten sich auf mehrere Milliarden €.

### Die Hurrikanhäufung der Jahre 2004 und 2005

Auch in den folgenden Jahren jagte ein klimatologischer Rekord den anderen: Im Jahre 2004 haben zum ersten Mal vier Hurrikane in einem Jahr Florida heimgesucht. Japan wurde erstmals von zehn Taifunen getroffen. Noch ungewöhnlicher war die Tatsache, dass zum ersten Mal im Südatlantik ein Hurrikan beobachtet wurde, dort wo bisher keine auftraten, aber nach Klimamodellrechnungen zukünftig welche zu erwarten sind. Noch ungewöhnlicher jedoch war das Jahr 2005: Noch nie wurden so viele tropische Wirbelstürme registriert (27), noch nie erreichten so viele von ihnen volle Hurrikanstärke (15) und niemals zuvor gab es drei Hurrikane der höchsten Kategorie.

Der Hurrikan Wilma war der stärkste, der je gemessen wurde und der tropische Wirbelsturm Vince machte deutlich, dass auch Europa zukünftig zu den von Wirbelstürmen bedrohten Gebieten gerechnet werden muss. Ein Zusammenhang zwischen der **Stärke** der Hurrikane und der globalen Erwärmung ist wahrscheinlich. Dass erhöhte Meerestemperaturen zu stärkeren Hurrikanen führen, ist empirisch bestätigt und wird bei Hurrikanvorhersagen routinemäßig berücksichtigt. Verwendet man Hurrikanprognosemodelle zur Analyse der bei einer globalen Erwärmung zu erwartenden Häufigkeit von Hurrikanen so sagen diese eine deutliche Zunahme der Anzahl **starker** Hurrikane voraus [8].

## Potenzielle Klimainstabilitäten

Seit dem Erscheinen des letzten großen Sachstandsberichtes [1] des Intergovernmental Panel on Climate Change im Jahre 2001 hat die Erforschung potenzieller Klimainstabilitäten erhebliche Fortschritte gemacht. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es in vielen Fällen zu einer Neubewertung gekommen ist und die Risiken, die vom Klimawandel ausgehen, nun deutlich höher eingeschätzt werden [9]. Neueste Messungen haben gezeigt, dass das grönländische Eisschild an seiner Peripherie schneller abschmilzt als man bisher angenommen hatte. Man geht nunmehr davon aus, dass ein irreversibles Abschmelzen des gesamten grönländischen Eisschildes und daraus resultierend ein Meeresspiegelanstieg um 7 m bereits durch eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur im Bereich von etwa 2°C (relativ zum vorindustriellen Wert<sup>1)</sup>) getriggert werden könnte. Auch eine Destabilisierung des Westantarktischen Eisschildes (langfristig verbunden mit einem Meeresspiegelanstieg um 4-6 m) könnte bereits bei deutlich niedrigeren Werten der Veränderung der globalen Mitteltemperatur (im Bereich von 2,5°C bis 4,5°C) einsetzen, als man noch vor kurzem geglaubt hatte. Bei einer Temperaturzunahme um 3,5°C schließlich steigt das Risiko dafür, dass die Landvegetation sich von einer CO<sub>2</sub>-Senke zu einer Quelle entwickelt und dadurch zur weiteren Verstärkung des Treibhauseffektes beiträgt, erheblich an. Inwieweit dies zusammen mit verstärkten Methanemissionen aus auftauenden Permafrostböden oder destabilisierten ozeanischen Methanhydratlagerstätten zu einem sog. "Runaway Greenhouse Effect" führen wird, kann derzeit nicht abschließend beantwortet werden. Oberhalb von 4°C ist auch ein Zusammenbruch des Nordatlantikstromes nicht mehr auszuschließen [10].

Die genannten Werte für die kritische Temperaturveränderung liegen in der Bandbreite dessen, was Klimamodellrechnungen bei einem einfachen „weiter so“ bereits bis zum Ende dieses Jahrhunderts erwarten lassen. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher sozio-ökonomischer Entwicklungspfade sowie der Unsicherheit im Bereich der Klimamodellierung wird hierfür ein Wertebereich von 2°C bis 6,4°C (bezogen auf den vorindustriellen Wert) angegeben [1].

Diese Feststellung sollte aber nicht dazu verleiten anzunehmen, dass wir erst gegen Ende des Jahrhunderts umzusteuern hätten, wenn wir das Auftreten der genannten Klimainstabilitäten mit großer Wahrscheinlichkeit vermeiden möchten. Denn aufgrund der Trägheit des Klimasystems prägt sich die zu einer emittierten Menge von Treibhausgasen gehörende Zunahme der globalen Mitteltemperatur erst Jahrhunderte nach der Emission vollständig aus. Es besteht somit die Gefahr, dass in den nächsten Dekaden zwar vielleicht noch nicht die kritischen Temperaturschwellen überschritten werden, aber dennoch soviel CO<sub>2</sub> emittiert wird, dass ein späteres Überschreiten auch bei Umsetzung einer noch so ehrgeizigen Emissionsminderungsstrategie nicht mehr verhindert werden kann.

1) In der genannten Literaturquelle beziehen sich die entsprechenden Schwellenwertangaben in der Regel auf die Temperaturveränderung im Vergleich zum „heutigen“ Wert (genauer dem Mittelwert der Jahre 1990-2000), der etwa um 0,6°C über dem vorindustriellen Wert liegt.

Dies betrifft möglicherweise auch die Frage der Stabilität des Nordatlantikstromes – der Verlängerung des Golfstromes – der als warmer, oberflächennaher Meeresstrom immense Wärmemengen nach Nordeuropa transportiert und unser Klima deutlich milder sein lässt, als dies aufgrund der Breitenlage Europas zu erwarten wäre. Eine computermodellbasierte Analyse dieser Frage gestaltet sich allerdings schwierig, da noch eine große Unsicherheit im Hinblick auf die Höhe wichtiger Parameterwerte besteht, die Einfluss auf das modellierte Verhalten des Nordatlantikstromes nehmen. Hierzu zählt neben der Klimasensitivität<sup>2)</sup> insbesondere auch die sog. hydrologische Sensitivität. Letztere quantifiziert die zusätzliche Menge an Süßwasser, die klimawandelbedingt in den Nordatlantik verfrachtet wird (z.B. durch verstärkte Niederschläge oder durch schmelzendes Gletscher- bzw. Meereis). Der zusätzliche Süßwassereintrag führt zu einer Senkung des Salzgehaltes und damit des spezifischen Gewichtes des Meerwassers, was dessen Absinken in die Tiefe erschwert. Der Nordatlantikstrom, der das absinkende Wasser ständig ersetzt, wird durch diesen Süßwassereintrag geschwächt bzw. im ungünstigsten Fall vollständig zum Erliegen gebracht.

Legt man einen mittleren Wert ("best guess") der hydrologischen Sensitivität zugrunde, so lässt sich unter Berücksichtigung einer erst jüngst verfügbar gewordenen Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Klimasensitivität der Emissionsspielraum bestimmen, der mit vorgegebenen Maximalwerten für die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Zusammenbruchs des Nordatlantikstromes verträglich ist (vgl. Abb. 2). Überschreitet ein CO<sub>2</sub>-Emissionspfad zum Beispiel die Obergrenze des 1%-Risiko-Korridors, so führt dies mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 1% zukünftig zu einem Zusammenbruch des Nordatlantikstromes (vorausgesetzt, die hydrologische Sensitivität weicht nicht zu sehr vom angenommenen Wert ab).

Die zukünftige Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen lässt sich nicht exakt vorhersagen. Es ist aber möglich, sog. Business-as-usual-Szenarien zu berechnen, die aufbauend auf sozio-ökonomische Annahmen die Emissionsentwicklung wiedergeben, die ohne Klimaschutzmaßnahmen zu erwarten ist. Geht man zum Beispiel von einer auf schnelles wirtschaftliches Wachstum ausgerichteten Weltwirtschaft aus, in der zugleich regionale Unterschiede betont werden, so ist mit einem Emissionsverlauf entsprechend dem Szenario A2 (s. Abb. 2) zu rechnen. Legt man stattdessen eine ökologisch orientierte Entwicklung einer globalisierten Welt zu Grunde, so führt dies zu deutlich geringeren Emissionen (B1).

Wie Abb. 2 zeigt, überschreiten die beispielhaft ausgewählten Business-as-usual-Emissionspfade A2 und B1 (die als Extremfälle die Emissionsbandbreite angeben, die ohne aktive Klimaschutzmaßnahmen zukünftig zu erwarten ist) noch vor dem Jahr 2025 den oberen Rand des 1%-Risiko-Korridors. Unter Zugrundelegung der genannten Annahmen kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass ohne umfassende

2) Darunter versteht man die bei einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (im Vergleich zum vorindustriellen Wert) langfristig zu erwartende Zunahme der globalen Mitteltemperatur. Vor allem aufgrund von Unterschieden in der Modellierung der Wolkenbildung weisen verschiedene Klimamodelle deutlich voneinander abweichende Klimasensitivitäten auf.

Klimaschutzmaßnahmen bereits innerhalb der nächsten zwei Dekaden ein Zusammenbruch des Nordatlantikstromes getriggert wird<sup>3)</sup>. Jenseits dieses „Point of no return“ führt in den durchgeführten Modellrechnungen die beschränkte Fähigkeit der Weltwirtschaft, die Emissionen beliebig schnell zu reduzieren, zu einer weiteren unvermeidlichen Akkumulation von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Im Verbund mit der großen Trägheit des Klimasystems reicht diese Emissionsmenge aus, langfristig einen irreversiblen Zusammenbruch des Nordatlantikstromes herbeizuführen.

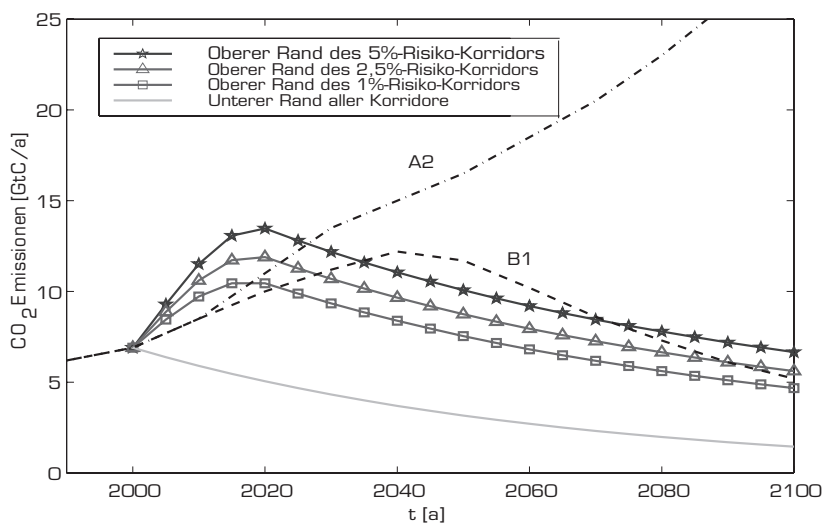


Abb. 2. Emissionskorridore zur Sicherstellung der Stabilität der Nordatlantikströmung. Emissionspfade, die den Korridor verlassen, führen mit der angegebenen Risikowahrscheinlichkeit (z.B. 1%) zu einem späteren Zusammenbruch des Nordatlantikstromes. Angegeben sind die oberen Korridorränder für eine maximale Zusammenbruchwahrscheinlichkeit von 1%, 2,5% bzw. 5% sowie die für all diese Fälle gemeinsame Korridoruntergrenze. Die gestrichelten Linien stellen plausible Business-as-usual-Emissionspfade dar (siehe Text). Quelle: K. Zickfeld, T. Bruckner, T. Kuhlbrodt: Safeguarding the Atlantic Thermohaline Circulation: A Sensitivity Analysis of Emission Corridors, International Conference on "Earth System Modeling", September 15-19, 2003, Hamburg, Germany (2003).

Die neuesten Forschungsergebnisse zeigen, dass das Auftreten irreversibler Klimainstabilitäten mit großer Wahrscheinlichkeit nur dann ausgeschlossen werden kann, wenn die Zunahme der globalen Mitteltemperatur auf maximal 2°C (bezogen auf den vorindustriellen Wert) begrenzt wird. Dies unterstützt die Forderung verschiedener Expertengremien (z.B. des Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen und der Klima-Enquete-Kommissionen des Deutschen Bundestages), die ein entsprechendes Klimaschutzziel aus Vorsorgegründen bereits in der Vergangenheit mehrfach vorgeschlagen haben. Die Europäische Union hat sich dieses Ziel 1996 zu Eigen gemacht und basierend auf den neuesten Erkenntnissen durch einen Beschluss des Europäischen Rates im Jahr 2005 erneut bekräftigt.

3) Die der Korridor-Analyse zugrundegelegten exemplarischen Wahrscheinlichkeitsgrenzwerte mögen auf den ersten Blick sehr restriktiv erscheinen. Vergleicht man diese jedoch mit den Anforderungen, die zum Beispiel an die Sicherheit von Kernkraftwerken gestellt werden (denen zufolge die Eintrittswahrscheinlichkeit eines schwerwiegenden Reaktorunfalls kleiner als  $10^{-6}$ /Jahr sein soll), so wird deutlich, dass dies nicht der Fall ist.



### **Kontinuierliche Klimafolgen**

Eine Diskussion der negativen Auswirkungen des globalen Klimawandels darf aber nicht auf die Betrachtung potenzieller Klimainstabilitäten beschränkt bleiben. Die mit der kontinuierlichen Veränderung des Klimas graduell anwachsenden Klimafolgen können ebenfalls ein Ausmaß annehmen, das nicht mehr toleriert werden kann. So ist z.B. oberhalb des genannten Temperaturgrenzwertes von 2°C auf globaler Ebene mit Verlusten bei der Agrarproduktion sowie mit einer steigenden Zahl der unter Wassermangel leidenden Menschen zu rechnen. Darüber hinaus ist zu befürchten, dass besonders empfindliche Ökosysteme, Habitats und Tierarten in vielen Regionen bereits unterhalb der genannten Schwelle nicht in der Lage sein werden, sich an die Klimaveränderungen und deren Wirkungen anzupassen.

Welche negativen Auswirkungen des kontinuierlichen Klimawandels zukünftig für Teile der Bundesrepublik Deutschland zu erwarten sind, konnte exemplarisch im Rahmen einer am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung erstellten Studie für das Land Brandenburg, das bereits heute zu den trockensten Regionen Deutschlands zählt, ermittelt werden. Nach dieser Studie ist dort bis zum Jahr 2050 mit einem zusätzlichen Temperaturanstieg um 1,4°C zu rechnen, verbunden mit einem deutlichen Rückgang der Bewölkung und der Niederschläge.

Der weitere Rückgang der bereits jetzt sinkenden Niederschlagsmenge bei gleichzeitig zunehmender Verdunstung lässt insbesondere in den Sommermonaten gravierende Folgen, wie zum Beispiel ein weiteres Absinken des Grundwasserspiegels, sinkende Wasserstände in den Flüssen, Probleme bei der Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität sowie – zumindest für einige Nutzpflanzen – eine Abnahme der landwirtschaftlichen Erträge erwarten. Als Folge der klimatischen Veränderung könnten darüber hinaus die in Brandenburg noch häufig anzutreffenden ausgedehnten Niederungen, Moore und Sumpfgebiete samt ihren vielfältigen ökologischen Funktionen verloren gehen.

### **Erforderliche Minderung der Treibhausgasemissionen**

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) hat in einem jüngst erschienenen Sondergutachten mit dem Titel „Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert“ erneut darauf hingewiesen, dass die vorgeschlagene Temperaturleitplanke von 2°C nur dann mit hoher Wahrscheinlichkeit eingehalten werden kann, wenn es gelingt, die CO<sub>2</sub>-Konzentration unterhalb eines Wertes von 450 ppm zu stabilisieren. Hierzu ist es auf globaler Ebene notwendig, bis 2050 eine Minderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 45-60% gegenüber 1990 zu erzielen.



Dies stellt angesichts der schwierigen internationalen klimapolitischen Situation sicherlich keine leichte Aufgabe dar. Wie jüngste Analysen zeigen (vgl. Abb. 3), liegen die Kosten einer Stabilisierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf einem Wert von 450 ppm aber vermutlich deutlich niedriger als man bisher geglaubt hatte. Dies gilt vor allem dann, wenn man berücksichtigt, dass die Kosten verschiedener innovativer Verfahren zur Reduktion von Treibhausgasen durch einen verstärkten Einsatz dieser Technologien und dem damit verbundenen technologischen Lernen deutlich reduziert werden können.

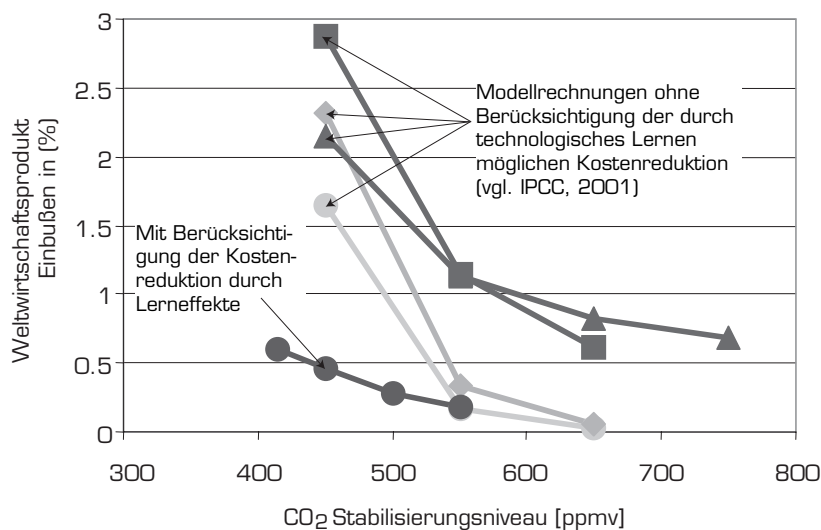


Abb. 3. Globale Minderungskostenschätzungen für verschiedene Stabilisierungsniveaus in 2100. Quelle: O. Edenhofer, H. J. Schellnhuber und N. Bauer [12]. Gezeigt werden Ergebnisse, die mit unterschiedlichen Modellen bestimmt wurden; die auf das diskutierte Klimaschutzziel (450 ppm) bezogenen Kosten sind hervorgehoben.

Gesteht man den Entwicklungsländern eine nachholende Entwicklung zu, so müssen die Emissionsminderungsziele der Industrieländer deutlich über dem globalen Durchschnitt liegen. Der WBGU sieht es deshalb als geboten an, in Deutschland die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um 80% zu senken [13]. Technologisch gesehen lässt sich dies ohne einen Verzicht auf gewohnte Energiedienstleistungen durch eine Kombinationsstrategie erreichen, die aus einer Minderung der Nutzenergienachfrage (z.B. durch verbesserte Wärmedämmung von Gebäuden), einer Erhöhung der Energieumwandlungseffizienz (z.B. der Kraftwerkswirkungsgrade), dem zunehmenden Einsatz CO<sub>2</sub>-armer Energieträger und regenerativer Energien sowie der CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus den Kraftwerksprozessen und einer anschließenden Entsorgung besteht.

## Zusammenfassung

Das klimaschutzbezogene Verhalten der Weltgemeinschaft lässt sich mit der Fahrt eines Luxusliners im Nordatlantik vergleichen. Mitte der 80er Jahre wurde das Risiko einer globalen Klimaveränderung erkannt, ohne bereits in der Lage zu sein, die daraus resultierenden Klimafolgen quantifizieren zu können. Der Nebel (der Unkenntnis) war dicht. Aber die (Erd-) Geschichte deutete darauf hin, dass die Kollision mit Eisbergen (das Triggern von Klimainstabilitäten) auf der eingeschlagenen Route nicht ausgeschlossen werden können.

Erste Modellrechnungen zur Bestimmung von Klimafolgen, die oftmals mit stark vereinfachten, statischen Modellen durchgeführt wurden, ermöglichten einen partiellen Erkenntnisgewinn, der in manchen Bereichen zu einer vorübergehenden Entwarnung führte. So erkannte man zum Beispiel, dass der Klimawandel zumindest für nicht zu große Temperaturveränderungen die Weltnahrungsmittelproduktion erhöhen könne, dass im Bereich der Vegetation zwar eine Verschiebung aber nicht notwendigerweise ein Zusammenbruch zu erwarten sei und dass die Eisschilde auf Grönland und im Bereich der Antarktis vermutlich stabiler als anfänglich erwartet seien. Die Nebeldecke hob sich etwas und zumindest in dem Bereich, der nun eingesehen werden konnte, ließen sich keine Eisberge ausmachen.

Mit zunehmendem Erkenntnisgewinn aber änderte sich das Bild. Das Schiff fuhr schneller als vermutet und am Horizont wurden mehrere große Eisberge (die Klimainstabilitäten) identifiziert, die sich auf Kollisionskurs befanden und deren Entfernung geringer war als ursprünglich gehofft. Gleichzeitig wurde auch die See rauer und die Zahl kleinerer Eisschollen (die Extremereignisse der letzten Jahre), die sich in den Weg stellten, nahm erschreckend zu.

Das Kyoto-Protokoll, mit seiner – im Vergleich zum langfristig Notwendigen – minimalen Emissionsreduktion, führte zu einer ersten, wenn auch marginalen Kurskorrektur. Obwohl für eine umfassende Kurskorrektur nur mehr wenig Zeit bleibt, streitet sich die Mannschaft derzeit darüber, ob man besser sofort eine weniger gefährliche Route einschlagen (EU-Strategie der verbindlichen Emissionsreduktionsziele) oder lieber die Wendigkeit des Schiffes erhöhen sollte, um später, falls es denn tatsächlich erforderlich sein sollte, den Eisbergen kurzfristig ausweichen zu können (US-Strategie der Technologieförderung).

Die neuesten Erkenntnisse haben gezeigt, wie wenig wir derzeit noch wissen und wie schnell sich die Bewertung der Gefahr verändern kann. Sinnvoll erscheint es aufgrund der immer noch erheblichen Unsicherheiten deshalb beides anzustreben: den Kurs zu ändern und gleichzeitig die Flexibilität des Systems – zum Beispiel durch die Entwicklung emissionsarmer Energieumwandlungstechnologien – zu erhöhen. Lange dachte man, dass die Kosten einer solchen Doppelstrategie prohibitiv seien. Dies muss, wie die einzig gute Nachricht der letzten Jahre gelehrt hat, nicht

der Fall zu sein (s. Abb. 3). Berücksichtigt man die Kostenreduktion, die durch technologisches Lernen erzielt werden kann, so erscheinen die hierdurch zu erwartenden Belastungen tragbar.

Sich **allein** auf eine Strategie der Technologieförderung zu verlassen und kurzfristige Emissionsminderungen zu unterlassen, ist sicherlich nicht verantwortbar. Keiner kann heute mit Sicherheit sagen, ob die ersehnten Innovationen tatsächlich eintreten und die emissionsarmen Technologien (z.B. die CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Entsorgung, die bisher nur in Demonstrationsprojekten erprobt ist) rechtzeitig in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen werden. Aber auf die Erforschung von Technologien zu verzichten, die potenziell einen Beitrag zur zukünftigen Emissionsminderung leisten können, wäre angesichts der Größe der vor uns stehenden Herausforderung ein ebenso falscher Ansatz.

### Kontakt

Dr. Thomas Bruckner,  
Institut für Energietechnik, Technische Universität Berlin  
Email: bruckner@iet.tu-berlin.de

Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber,  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung  
Email: schellnhuber@pik-potsdam.de

### Literaturquellen:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2001. Cambridge University Press, Cambridge (2001).
- [2] J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato, K. Lo: Global Temperature Trends: 2005 Summation, NASA Goddard Institute for Space Studies and Columbia University Earth Institute New York, (2005).  
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/2005/>
- [3] European Environment Agency: Impacts of Europe's Changing Climate, An Indicator Based Assessment, Luxembourg (2004).
- [4] NASA Goddard Space Flight Centre: Arctic Sea Ice Continues to Decline, Arctic Temperatures Continue to Rise in 2005, Greenbelt, USA (2005).  
[http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2005/arcticice\\_decline.html](http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2005/arcticice_decline.html)
- [5] Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) Overview Report. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment, Cambridge University Press (2004).

- [6] Umweltbundesamt: Die Zukunft in unseren Händen: 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts und ihre Begründungen, Dessau (2005).
- [7] C. Schär, G. Jendritzky: Hot News from Summer 2003. *Nature* 432, 559-560 (2004).
- [8] S. Rahmstorf: Dem Sturm begegnen, *Klima & Wandel* (2005).
- [9] H. J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley, G. Yohe: *Avoiding Dangerous Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (2006).
- [10] K. Zickfeld, T. Bruckner: Reducing the Risk of Abrupt Climate Change: Emissions Corridors Preserving the Atlantic Thermohaline Circulation. *Integrated Assessment* 4, 106 - 115 (2003).
- [11] K. Zickfeld, T. Bruckner, T. Kuhlbrodt: Safeguarding the Atlantic Thermohaline Circulation: A Sensitivity Analysis of Emission Corridors, International Conference on "Earth System Modelling", September 15-19, 2003, Hamburg, Germany (2003).
- [12] O. Edenhofer, H. J. Schellnhuber und N. Bauer: Der Lohn des Mutes. Gestaltungsspielräume für eine internationale Klima- und Energiepolitik, *Internationale Politik*, Augustausgabe 2004 (2004).
- [13] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): *Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit*, Springer-Verlag, Berlin (2003).