

## Globale Erwärmung als Auslöser einer abrupten Klimaänderung?

**Kürzlich hat ein Bericht, erstellt im Auftrag des Pentagon, über das mögliche Szenario einer abrupten Klimaänderung die Gemüter bewegt. Darin werden erschreckende Auswirkungen auf Gesellschaft und Umwelt prognostiziert. Das gleiche Thema steht im Mittelpunkt des Films „The Day After Tomorrow“, der in Kürze auf der Leinwand zu sehen ist. Der interessierte Kinobesucher mag sich die Frage nach dem klimawissenschaftlichen Hintergrund stellen.**

**Die Prognosen über die zukünftige Klimaentwicklung zeigen eine zunehmende Übereinstimmung, und die Auswirkungen auf andere Klimaelemente scheinen kalkulierbar. Wissen wir genug über die Globale Erwärmung? Oder könnte der momentane Temperaturanstieg nebst den abschätzbaren auch völlig unerwartete Konsequenzen in Form einer sprunghaften Klimaänderung haben?**

**Die Klimageschichte zeigt, dass sich in der Vergangenheit das Klima mehrmals überraschend und innert kurzer Zeit stark verändert hat. Als Auslöser einer solchen Veränderung kommt heute nebst natürlichen Faktoren auch die globale Erwärmung in Frage. Eine abrupte Klimaänderung ist in den nächsten Jahrzehnten aufgrund des heutigen Wissensstandes unwahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden. Bei tatsächlichem Eintreten ist jedoch mit gravierenden Auswirkungen zu rechnen.**

Es wird wärmer. Darüber und über den Menschen als Hauptverursacher sind sich fast alle Wissenschaftler einig. Die Klimageschichte zeigt, dass das Klima auch in der Vergangenheit einem ständigen Auf und Ab unterworfen war. Nebst langsamen, kontinuierlichen Veränderungen zeigt das vergangene Klima auch unerwartet schnelle Wechsel und überraschende „Sprünge“. Bei einer sogenannt abrupten Klimaänderung erreicht und übersteigt das Klimasystem unter Einfluss einer oder mehrerer Faktoren eine kritische Grenze. In der Folge wird eine Reaktion hervorgerufen, die das Klimasystem oder Teile davon in einen neuen Zustand überführt, und zwar mit einem Tempo, das vom auslösenden Faktor unabhängig ist. So kann ein langsam und stetig stimulierender Faktor

plötzlich unerwartete Konsequenzen haben. Man spricht in diesem Zusammenhang von nicht-linearen Reaktionen. Die momentane Klimaerwärmung birgt deshalb nebst dem prognostizierten Temperaturanstieg und den zunehmend genauer modellierbaren Auswirkungen auf die Klimaelemente wie z.B. Niederschlag ein schwer abschätzbares Risiko.

Voraussagen abrupter Klimaereignisse sind mit den bisherigen Kenntnissen kaum möglich. Die Problematik liegt zunächst darin, im Klimasystem Nicht-Linearitäten zu erkennen. Nicht-lineare Systeme haben manchmal die Eigenschaft, dass sie sich innerhalb bestimmter Grenzen selbst regulieren. Wird aber diese Grenze überschritten, kippt das System plötzlich, d.h. es nimmt einen anderen Modus an oder bricht zusammen. Das Risiko einer solchen Zustandsveränderung im Klimasystem ist schwer abschätzbar, weil die kritischen Grenzen nicht bekannt sind.

### Der Golfstrom war nicht immer stabil

Ein bekanntes und wissenschaftlich intensiv erforschtes nicht-lineares System ist die sogenannte Thermohaline Zirkulation (THC), ein Kreislauf von Meeresströmungen, der auch den Golfstrom beinhaltet. Sie wird durch Unterschiede in Temperatur und Salzgehalt des Meerwassers angetrieben. Im Nordatlantik im Bereich der Grönland- und der Labrador-See sinkt das kalte, salzreiche Meerwasser aufgrund der hohen Dichte ab und schiebt das Wasser in der Tiefe in Richtung Äquator. Im Sog des absinkenden Wassers strömt wärmeres Meerwasser aus dem Süden nach, das sich dann ebenfalls abkühlt und wiederum absinkt. Als Teil des warmen polwärts fließenden Oberflächenstroms wirkt der warme Golfstrom als „Zentralheizung“ Europas.

Aus der Klimaforschung ist bekannt, dass die Thermohaline Zirkulation nicht völlig stabil ist und verschiedene Modi annehmen kann. Computersimulationen zeigen, dass sich bei Erwärmung oder Verdünnung des schweren, salzreichen Wassers im Nordatlantik, z.B. durch

grosse Niederschlagsmengen oder Schmelzwasser von Gletschern oder vom Grönland-Eisschild, die Zirkulation verlangsamt. Eine weitere Zufuhr von Süswasser schwächt den Strom weiter ab, was schliesslich zu einem Zusammenbruch des Systems führen kann.

### **Abrupte Klimaänderungen während der Eiszeit**

Ein geschichtlicher Rückblick zeigt mögliche „Sprünge“ im Klima und liefert Hinweise auf vorhandene nicht-lineare Systeme und auslösende Faktoren. Abrupt stattfindende Klimaereignisse während der letzten Eiszeit können anhand von Eisbohrkernen, Meeressedimenten, Baumringen und anderen paläoklimatischen Daten nachgewiesen werden. So haben Klimaforscher während der Eiszeit sowohl abrupte Warmphasen als auch plötzliche massive Kaltphasen identifiziert. In Grönland und auch in Teilen Europas stiegen die Temperaturen bei Warmereignissen innerhalb von ein bis zwei Jahrzehnten um bis zu zehn Grad. In der Klimaforschung geht man heute davon aus, dass die extremen Kalt- und Warmphasen während der letzten Eiszeit unter anderem in Zusammenhang mit der Thermohalinen Zirkulation stehen. Es konnte gezeigt werden, dass drei quasi-stabile Zustände existieren, und zwar (1) der „warme“, interglaziale Modus mit Wärmetransport in Richtung Pole, (2) der „kalte“ Modus mit stark reduziertem Wärmetransport und (3) der Zusammenbruch der Zirkulation. Die abrupten Klimaveränderungen während der letzten Eiszeit können grossenteils mit Wechseln zwischen diesen Zuständen erklärt werden. Es scheint, dass sich das System zu dieser Zeit im Grenzbereich zwischen zwei Modi befunden hat und deshalb labiler war als während der nachfolgenden Warmzeit. Eine verstärkende Rolle können die arktischen Eismassen spielen: Bei einer Abkühlung dehnen sie sich aus, und weil sie viel weniger Sonnenstrahlung aufnehmen als eine Wasser- oder Landfläche, bewirken sie eine weitere Abkühlung. Bei einer Erwärmung führt das Abschmelzen analog zu einer weiteren Aufheizung. Nicht endgültig geklärt ist die Frage nach dem Auslöser dieser Wechsel. Vermutlich spielen sowohl äussere Faktoren (z.B. astronomische oder solare Zyklen) wie auch klimaspezifische Faktoren (z.B. Gletscherabbrüche) eine Rolle.

Nebst der Thermohalinen Zirkulation gibt es weitere Mechanismen, die starke Klimawechsel auslösen können. So hat vor ca. 5'500 Jahren wahrscheinlich ein Rückkoppelungsmechanismus zwischen Vegetation und Monsunniederschlag zur Desertifikation der Sahara geführt. Während sich die Bedingungen für Monsunregen über der Sahara aufgrund der langsam wandernden Sonnenbahn über die Jahrtausende verschlechterte, konnte sich die Vegetation lange Zeit aufrechterhalten, bis sie ab einem bestimmten Zeitpunkt sehr rasch bleibend degenerierte.

### **Was könnte geschehen?**

Im Hinblick auf das zukünftige Risiko von abrupten Klimaänderungen werden von den Klimawissenschaftlern Prozesse untersucht, die bei entsprechender Beeinflussung nicht-linear reagieren und daher eine potenzielle Gefahr darstellen. Es handelt sich dabei um Interaktionen zwischen der atmosphärischen Zirkulation und anderen Elementen des Erdsystems. Von Bedeutung sind insbesondere Atmosphäre-Biosphäre-Wechselwirkungen, Atmosphäre-Eis-Wechselwirkungen, und Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungen.

#### *Abholzungen verändern den Wasserkreislauf*

In den Bereich Atmosphäre-Biosphäre-Wechselwirkungen gehört die oben erwähnte Desertifikation im Sahara-Gebiet aufgrund von Veränderungen in der Monsunzirkulation. Auch in anderen Regionen wird ein irreversibler Wechsel der Vegetationsform für möglich gehalten, insbesondere in bestimmten Gegenden Afrikas, Südasiens und Australiens. In diesen Gebieten scheinen verschiedene stabile Atmosphäre-Biosphäre-Gleichgewichte zu existieren. Wird ein solches System zu stark gestört, kehrt es unter Umständen nicht zum ursprünglichen Gleichgewichtszustand zurück.

Beispielsweise können grossflächige Abholzungen dazu führen, dass sich durch die wegfallende Verdunstung der Bäume der Wasserkreislauf ändert und sich ein anderes Klimaregime etablieren kann. So wird angenommen, dass nebst den grossklimatischen Zyklen die Vernichtung der Wälder des Nigerbeckens einen Einfluss auf die Sahel-Austrocknung hatte. Aktualität hat in diesem Zusammenhang der Verlust der tropischen Waldgebiete im Amazonasbecken. Auch wenn der Abholzungsprozess viele Jahrzehnte dauert, könnten Umstellungen im Wasserkreislauf unter Umständen beschleunigt erfolgen. Dies hätte nicht nur Auswirkungen auf das abgeholzte Gebiet selbst: Das Amazonasbecken exportiert viel Feuchtigkeit in Regionen, deren Landwirtschaft und Waldwachstum sehr empfindlich auf eine Niederschlagsreduktion reagieren.

#### *Wie stabil ist der Westantarktische Eisschild?*

Lineare Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Eismassen äussern sich als leicht nachvollziehbarer Zusammenhang zwischen globaler Erwärmung, schmelzendem Gletschereis und erhöhtem Meeresspiegel. Auch in diesem Bereich wird aber die Möglichkeit nicht-linearer Auswirkungen vermutet und untersucht. Ein mögliches Szenario ist der Zerfall des West-Antarktischen Eisschildes, verbunden mit einem Anstieg des Meeresspiegels um einige Meter. Sowohl in Bezug auf das Risiko eines solchen Ereignisses wie auch auf die Geschwindigkeit des Ablaufes sind sich die Wissenschaftler nicht einig. Einigkeit herrscht einzig darüber, dass der Westantarktische Eisschild als

instabiler erachtet wird als andere Eismassen, da er zu einem grossen Teil auf dem Meeresgrund aufliegt. Unsicherheitsfaktoren sind einerseits die Stabilität des umgebenden Schelfeises, das die Eismasse stützt, und andererseits das Fliessverhalten der Inlandschmelzflüsse, das in Bezug auf Wassermenge und Flusslauf grossen Änderungen unterworfen ist.

Das Abschmelzen stabiler grosser Eisschilde wie zum Beispiel desjenigen in Grönland dauert Jahrhunderte bis Jahrtausende. Der Schmelzprozess kann bei anhaltender Erwärmung beschleunigt werden, indem zurückbleibender Staub und Moränenmaterial die Strahlungsaufnahme der Eisoberfläche erhöhen. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Prozess gleichgerichtet weiterläuft und irreversibel wird.

Auch Permafrostgebiete stellen bei steigenden Temperaturen ein potenzielles Risiko dar. In gefrorenen Moor-Böden sind grosse Mengen an Treibhausgasen in Form von Methanhydraten und Methan gespeichert, die beim Auftauen in die Atmosphäre gelangen. Der dadurch massiv verstärkte Treibhauseffekt würde die globalen Temperaturen noch mehr anheizen. Auch am Meeresboden sind Methanhydrate gespeichert, die unter Umständen grosse Methanmengen an die Oberfläche und in die Atmosphäre abgeben könnten.

Im Zusammenspiel Atmosphäre-Ozean ist El Niño ein wichtiger Zirkulationsmechanismus. Meeresströmung und atmosphärische Zirkulation bilden einen Feuchte- und Wärmekreislauf im und über dem äquatorialen Pazifik. Inwieweit die Variabilität von El Niño zufällig ist oder durch Rückkoppelungsmechanismen verstärkt wird, ist unklar. Daher lassen sich auch die Folgen der globalen Erwärmung auf diesen Zyklus kaum abschätzen und plötzliche Veränderungen im Modus nicht ausschliessen.

#### *Keine Eiszeit zu erwarten*

Die bereits erwähnte Thermohaline Zirkulation ist das am besten untersuchte System im Zusammenhang mit abrupten Klimaänderungen. Umstellungen in diesem System sind allerdings nur aus Eiszeiten bekannt. Wie es in der heutigen Situation, einer Warmzeit, auf eine starke Erwärmung reagiert, ist mangels Erfahrung aus der Vergangenheit schwer absehbar. Bei einem Zusammenbruch der Zirkulation wäre eine Abkühlung in Europa möglich, eine Eiszeit ist hingegen nicht zu erwarten. Modellrechnungen zeigen auch für den Fall eines Zusammenbruchs als globalen Nettoeffekt eine Erwärmung, d.h. die Wirkung der Treibhausgase würde den Abkühlungseffekt mehr als wettmachen. Ein wahrscheinlicheres Szenario als der Zusammenbruch der Thermohalinen Zirkulation ist deren Abschwächung. Dies hätte auch in Europa nur eine Verlangsamung der anthropogenen Erwärmung zur Folge.

#### **Kontaktpersonen:**

Prof. Thomas Stocker, Klima- und Umweltphysik,  
Universität Bern, Sidlerstr. 5, CH-3012 Bern,  
Tel: 031/631 44 62, Fax: 031/631 87 42,  
e-mail: stocker@climate.unibe.ch

Dr. Fortunat Joos, Physikalisches Institut, Klima- und  
Umweltphysik, Universität Bern, Sidlerstr. 5,  
CH-3012 Bern, Tel. 031/631 44 61, Fax: 01/631 87 42,  
e-mail: joos@climate.unibe.ch

Prof. Christian Körner, Botanisches Institut,  
Universität Basel, Schönbeinstr. 6, CH-4056 Basel,  
Tel: 061/267 35 10, Fax: 061/267 35 04  
e-mail: ch.koerner@unibas.ch

#### **Riskantes Experiment**

Bei der momentanen Klimaerwärmung handelt es sich (noch) nicht um eine abrupte Klimaänderung, auch wenn die Temperaturzunahme bedenklich ist und relativ rasch erfolgt. Die Erwärmung zeigt, abgesehen von kurzfristigen natürlichen Schwankungen, einen mehr oder weniger stetigen Anstieg, der direkt mit dem Treibhauseffekt in Verbindung gebracht werden kann. Die globale Erwärmung kann aber als auslösender oder mitverursachender Faktor eine abrupte Klimaänderung provozieren, sofern sie ein Teilsystem des Klimas zum Kippen bringt. Ein externer CO<sub>2</sub>-Eintrag von der aktuellen Grössenordnung während einer Warmzeit ist ein erstmaliges Ereignis und damit ein Experiment mit ungewissem Ausgang. Nebst bekannten oder vermuteten Auslösern für abrupte Klimaänderungen besteht auch das Risiko bisher unbekannter Mechanismen. Ein „Klimasprung“ würde Mensch und Natur vor grosse Anpassungsprobleme stellen, da nebst dem Ausmass einer Veränderung insbesondere auch deren Tempo sehr entscheidend ist. Die erwarteten Folgen für ökologische und ökonomische Systeme sind um ein Vielfaches schwerwiegender als bei einer langsam stattfindenden Veränderung.

---

# Internetseiten

---

Eine Übersicht über abrupte Klimaänderungen (Buchkapitel) vom Potsdam-Institut für Klimaforschung:  
[http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Book\\_chapters/abrupt.pdf](http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Book_chapters/abrupt.pdf)

Eine ausführliche Übersicht über abrupte Klimaänderungen der U.S. Academy of Sciences:  
<http://books.nap.edu/books/0309074347/html/index.html>