



Video des gesamten Vortrages auf beigelegter DVD

# Klimawandel – Fakten, Folgen, Risiken

## Grundlagen des Klimawandels

Die Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Stickoxiden in der Atmosphäre steigen rapide an. Dieser Anstieg ist vollständig auf anthropogene Emissionen zurückzuführen. Die Absorptionsspektren und damit die Treibhauswirkung dieser Moleküle sind aus grundlegenden physikalischen Berechnungen und Laborexperimenten bekannt. Die Aufnahme durch terrestrische Vegetation und die Ozeane verringert zwar die Menge des in der Atmosphäre verbleibenden CO<sub>2</sub> um etwa 46%. Die überwiegend positiven klimatischen Rückkopplungen verstärken aber den direkten Strahlungseffekt und führen zu einer „Klimasensitivität“ von 3±1 °C. Das ist die globale Erwärmung, welche aus einer Verdopplung der vorindustriellen Kohlendioxidkonzentration von 280 ppm auf 560 ppm resultiert. Diese Erkenntnisse sind unter Klimaforschern unbestritten, unabhängig von Modellsimulationen und basieren auf fundamentalen physikalischen Gleichungen. Sie sind der Grund weshalb eine vermehrte zukünftige Erwärmung eine sichere Folge von weiterem Treibhausgasausstoß ist.

Eine davon getrennt zu betrachtende Frage ist die, ob wir bereits heute das Klima verändert haben. Derzeit wird eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 380 ppm gemessen; hinzu kommen die anderen anthropogenen Treibhausgase, so dass wir uns im Bereich von etwa 420 ppm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten befinden. Der im letzten Jahrhundert beobachtete Temperaturanstieg von global etwa 0,8 °C ist konsistent mit dieser atmosphärischen Zusammensetzung, insbesondere dem kühlenden Effekt der Verschmutzung durch Aerosole in der Atmosphäre, der den Treibhaus-effekt teilweise maskiert. Wenigstens seit 60 Jahren zeigt keiner der natürlichen Einflussfaktoren auf die globale Mitteltemperatur (Vulkane, Sonneneinstrahlung, kosmische Strahlung etc.) einen vergleichbaren konsistenten Trend. Werden neben den natürlichen Einflüssen auch die anthropogenen Treibhausgase berücksichtigt, dann können Klimamodelle die Entwicklung des letzten Jahrhunderts simulieren, ohne diese aber nicht. Im Rahmen der Temperaturschwankungen der letzten 1000 Jahre ist bereits diese vermeintlich geringe Erwärmung von 0,8 °C ungewöhnlich (Abb. 1).

Prof. Dr. Anders Levermann  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)  
Anders.Levermann@pik-potsdam.de

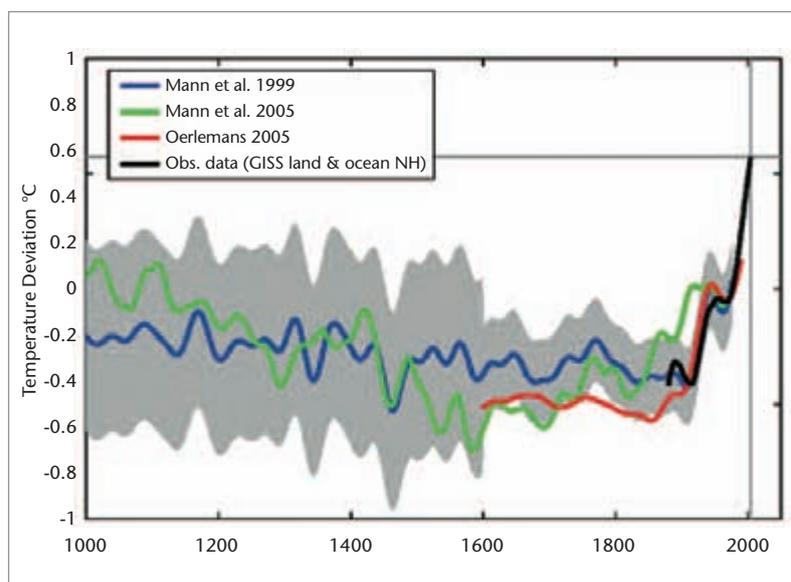
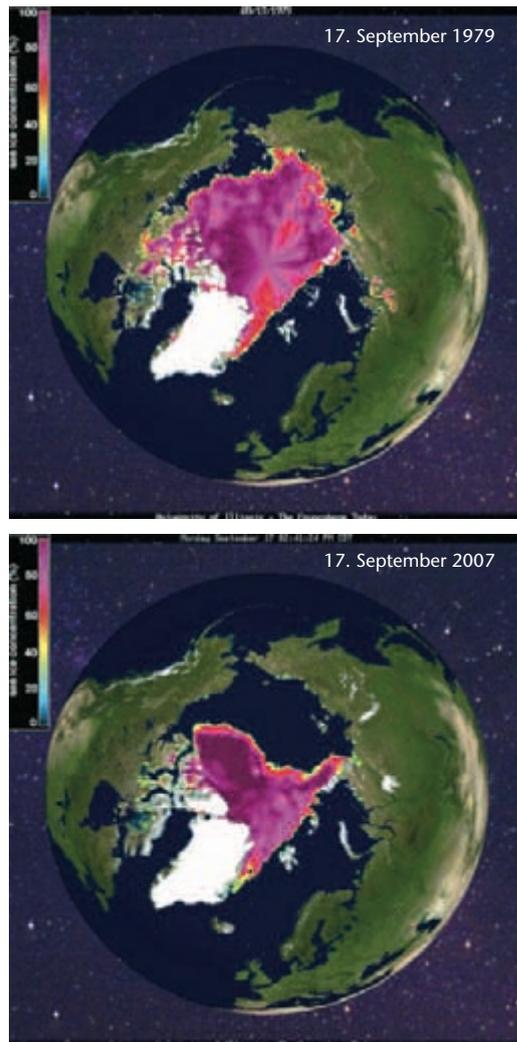


Abbildung 1  
Temperaturschwankungen der Nordhemisphäre während des letzten Millenniums. Rekonstruktionen aus Baumringen (Mann et al. 99) werden mittlerweile gestützt von einer Reihe von anderen Methoden und Datensätzen. Der beobachtete Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre (schwarze Kurve) kann weder durch natürliche Schwankungen noch durch Rekonstruktionsunsicherheiten (graue Schattierung) erklärt werden.

Abbildung 2  
Satellitenaufnahmen  
der minimalen  
Meereisbedeckung im  
arktischen Sommer,  
1979 und 2007

Quelle: Cryosphere  
Today, 2007



## Bereits beobachtete Folgen

Obwohl sich das Erwärmungssignal der letzten 100 Jahre erst relativ gering aus dem Hintergrund von Unsicherheit und natürlichen Schwankungen abhebt, werden bereits heute Folgen des Klimawandels beobachtet. Zu diesen gehören ein globales Abschmelzen von Gebirgsgletschern und ein Anstieg des Meeresspiegel um 15 bis 20 cm während des letzten Jahrhunderts. Das arktische Meereis zeigt einen dramatischen Rückgang (Abb. 2.) aufgrund einer selbst verstärkenden Rückkopplung: Schmelzendes helles Eis bringt mehr dunkle Meeresoberfläche zum Vorschein. Dadurch wird mehr einfallende Sonnenstrahlung absorbiert statt reflektiert. Die resultierende Erwärmung verstärkt das Eisschmelzen (Eis-Albedo-Feedback).

Solche selbst verstärkenden Rückkopplungen spielen eine besondere Rolle im Klimasystem, da sie zu besonders drastischen Reaktionen einiger Teilsysteme auf bereits kleine Störungen führen können. Dieses ist insbesondere wichtig im Bezug auf mögliche zukünftige Risiken in einer sich erwärmenden Welt.

## Projektionen für die Zukunft

Im Rahmen der Projektionen der Temperaturentwicklung für das nächste Jahrhundert, nehmen sich Schwankungen in der Vergangenheit, Rekonstruktionsunsicherheit und selbst der bereits beobachtete Anstieg relativ gering aus (Abb. 3). Das sogenannte „business as usual“ Szenario (rote Kurve), bei dem die Emissionen in ähnlicher Weise wie bisher ansteigen, zeigt im Mittel aller Modelle einen Anstieg von etwa 4°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit. Die Hauptunsicherheit in der zukünftigen Entwicklung resultiert nicht aus einer Modellunsicherheit (Schattierung in Abb. 3) sondern aus der Unsicherheit unseres sozio-ökonomischen und politischen Handelns (Unterschied zwischen den Kurven).

Im Jahre 1996 hat die EU das politische Ziel formuliert, dass, um „gefährlichen Klimawandel“ zu vermeiden, der globale Temperaturanstieg im Vergleich zu vorindustrieller Zeit unter 2°C gehalten werden muss. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen global die Treibhausgasemissionen bis 2050 um wenigstens 50 % im Bezug auf 1990 reduziert werden. Durch Unsicherheiten in unserem derzeitigen Verständnis des Klimasystems ist es möglich, dass auch eine 40 % Reduktion ausreicht, vielleicht werden aber auch 70 % benötigt. Da das Klimasystem auf Dauer nahezu kein Kohlendioxid aufnehmen kann, muss nach 2050 der Ausstoß praktisch gänzlich eingestellt werden. Keines der in *Abbildung 3* gezeigten Szenarien impliziert politische Vermeidungsstrategien. Die Projektionen legen nahe, dass diese nötig sind, um das 2°C-Ziel der EU zu erreichen und z. B. ein vollständiges Abschmelzen des grönländischen Eisschildes zu verhindern.

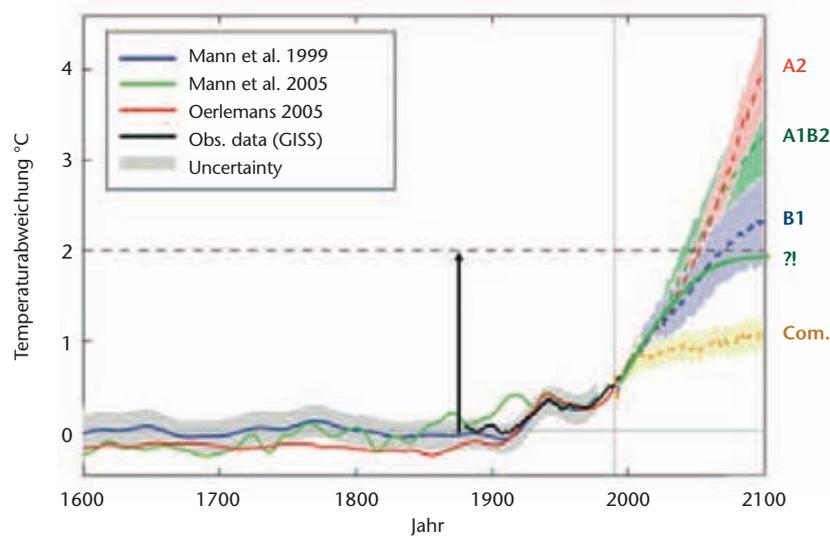


Abbildung 3  
Projektionen der künftigen Temperaturentwicklung im 21. Jahrhundert (Quelle: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) und die Rekonstruktionen der nordhemisphärischen Temperatur-schwankung der letzten 400 Jahre aus Abbildung 1. Die Kurven zeigen drei unterschiedliche sozio-ökonomische Szenarien: Rot = „business as usual“-Szenario – die Emissionen steigen in mit heute vergleichbarer Weise an. Gelb = konstante CO<sub>2</sub>-Konzentration ab dem Jahre 2000 zeigt den bereits verursachten aber noch nicht beobachteten Anstieg. Die Schattierung spiegelt die Unterschiede zwischen den Modellen wieder.

## Risiken in einer wärmeren Welt – Was bedeutet gefährlicher Klimawandel?

Eine Reihe von möglichen Folgen des anthropogenen Klimawandels sind nicht im Vorhinein mit Sicherheit zu quantifizieren, möglicherweise nicht einmal zu identifizieren. Beobachtete Zeitreihen sind zu kurz für statistisch signifikante Aussagen und das wissenschaftliche Verständnis ist unvollständig. Obwohl sich diese Situation in der nahen Zukunft wahrscheinlich nicht grundlegend ändern wird, lassen sich bestimmte Risiken aufgrund von physikalischen Mechanismen schon heute aufzeigen. Aufgrund der Unsicherheiten ist es wichtig, Risiken nicht mit Projektionen oder gar Vorhersagen zu verwechseln.

Als ein Beispiel wird eine Zunahme von Extremereignissen erwartet, wie Hitzewellen, Dürren, Überschwemmungen und auch extreme Kälteperioden. Die Gründe hierfür liegen in der erhöhten Energie in einem wärmeren Klimasystem, in der Geschwindigkeit des anthropogenen Klimawandels und darin, dass eine wärmere Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen kann. Der Anstieg der tropischen Meeresoberflächentemperatur kann zudem zu einer Verstärkung der Hurricaneaktivität führen, konsistent mit den beobachteten Rekordjahren 2004 und 2005.

Eine Reihe von Risiken lassen sich als so genannte Tipping-points oder Kippprozesse des Klimasystems klassifizieren (Abb. 4). Hierbei handelt es sich um Prozesse, die einen Schwellenwert für eine akzeptable äußere Störung besitzen und die daher besonders empfindlich auf bereits kleine Klimaänderungen reagieren. Wird dieser Schwellenwert überschritten, so führt die Eigendynamik des Systems zu einer möglicherweise irreversiblen Zustandsänderung.

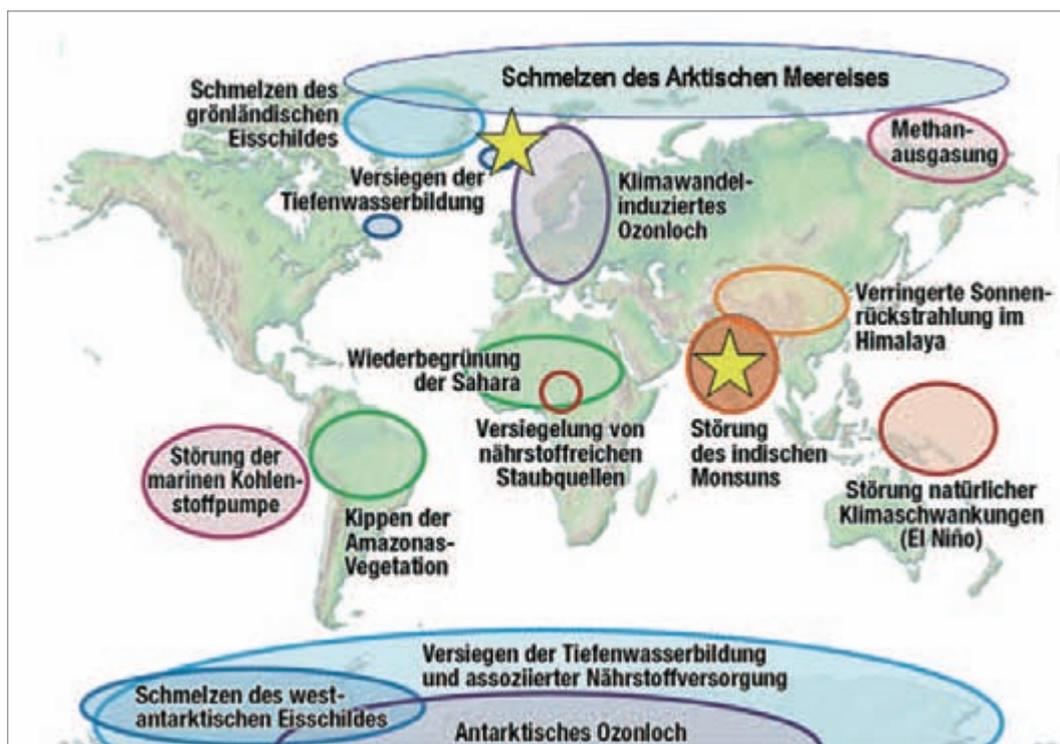
Tipping-points des Klimasystems stellen daher eine besondere Klasse von Risiken der Klimadynamik dar. So könnte möglicherweise auch ein Klimazustand ohne eine atlantische thermohaline Zirkulation stabil sein. Die Wahrscheinlichkeit für derartige Destabilisierungen sind zwar möglicherweise gering, die Auswirkungen wären aber drastisch.

Das Schmelzen des grönländischen Eisschildes ist ein möglicher Tipping-point. Das Eisschild wird durch Schnellfall in großer Höhe des bis zu 3500 m hohen Eises genährt. Durch langsames Abfließen des Eises in niedrigere und damit wärmere Höhen schmilzt es und verliert dadurch Masse. Ein Ungleichgewicht mit stärkerem Schmelzen im Vergleich zur Schneeakkumulation kann die Höhe des gesamten Eisschildes reduzieren und damit die Abschmelzgebiete vergrößern – ein selbst verstärkender und damit möglicherweise instabiler Prozess. Satellitenaufnahmen seit 1979 zeigen starke Schwankungen in der Ausdehnung der Abschmelzgebiete von

Abbildung 4  
Die gegenwärtigen  
Risikozonen (Tipping-  
points) der Erde

Als Tipping-points wer-  
den Prozesse bezeich-  
net, die aufgrund von  
selbstverstärkenden  
Rückkopplungen einen  
Schwellenwert besit-  
zen. Wird dieser über-  
schritten, reagiert das  
System besonders  
sensitiv auf bereits  
kleine äußere Störun-  
gen und entwickelt  
eine Eigendynamik hin  
zu einem anderen  
Zustand.

Quelle: FAZ



Jahr zu Jahr. Im Mittel ist jedoch ein Abschmelzen von etwa 16 % zu erkennen. Viele Prozesse im Bezug auf Landeisdynamik sind nur unzureichend verstanden und werden in Modellen nicht berücksichtigt, so dass eine große Unsicherheit bestehen bleibt. Sicher ist aber, dass ein vollständiges Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes den Meeresspiegel global um 7 m erhöht. Das westantarktische Eisschild ergäbe weitere 6 m, das ostantarktische zusätzlich etwa 50 m.

Ein weiterer möglicherweise instabiler Prozess ist die dichtegetriebene Ozeanzirkulation im Nordatlantik. Erwärmung oder verstärkter Süßwasser-eintrag in den Nordatlantik könnte die Dichte des Wassers dort so stark verringern, dass das Absinken, d. h. die Tiefenwasserbildung, zum Erliegen käme. In diesem Fall – so zeigt eine in Computersimulationen – würde sich das Klima auf der Erde rapide und drastisch ändern. Nordeuropa würde eine dramatische Abkühlung erfahren, während der Süden sich erwärmte. Der Meeresspiegel würde um bis zu einem Meter im Nordatlantik ansteigen, zusätzlich zum bereits beobachteten Anstieg durch Ausdehnung des sich erwärmenden Wassers und

zusätzlichem Wassereintrag durch Gletscherschmelzen. Die Auswirkungen für das atlantische Ökosystem und die Kohlendioxidaufnahme des Ozeans wären dramatisch.

Ein dynamisch sehr ähnlicher Mechanismus wie der, der für die mögliche Instabilität der Ozeanzirkulation verantwortlich ist, existiert als theoretische Möglichkeit für den indischen Monsun. Es könnte sein, dass nicht nur der jetzige Zustand mit funktionierendem Monsun stabil ist, sondern, dass eine Situation ohne Monsunregen ebenso persistent wäre. In einem konzeptionellen Modell wurde gezeigt, dass ein Übergang zwischen diesen beiden Zuständen, durch starke Luftverschmutzung herbeigeführt werden könnte.

Im Gegensatz zu Zukunftsprojektionen, müssen Tipping-points im Rahmen von Risikoabschätzung betrachtet werden. Die Wahrscheinlichkeit einer Destabilisierung dieser Kippprozesse ist häufig sehr gering, während die Konsequenzen dramatisch sind. Es ist eine gesellschaftliche, keine rein wissenschaftliche Aufgabe, abzuwägen, welche Risiken akzeptable sind und welche nicht.