

Einflussfaktoren und Auswirkungen des Klimawandels - zwei Szenarien

Von

Friederike Otto

Environmental Change Institute,

University of Oxford

2012

Inhalt

1 Einleitung	2
2 Aufbau und Auswahl von Emissionsszenarien.....	3
3 Szenario „Business as usual“ – Weiter wie bisher.....	6
3.1 Kippelemente.....	7
3.2 Globale Auswirkungen.....	9
3.3 Bedeutung für Europa	12
4 Szenario erfolgreicher Klimapolitik.....	15
4.1 Das politische 2° C-Ziel-Szenario	15
4.2 Sicherer Klimawandel.....	17
4.3 Verminderte Risiken durch erfolgreiche Klimapolitik.....	20
Bibliographie.....	22

1 Einleitung

Ein Szenario ist ein Szenario, eine Projektion, keine Vorhersage. Der anthropogene, also vom Menschen verursachte, Klimawandel ist eine Tatsache. Das bedeutet, dass wir als globale Gesellschaft eine weltweite Erwärmung erfahren werden, die mindestens der bereits in der Atmosphäre vorhandenen Konzentration von Treibhausgasen, und damit insbesondere Kohlendioxid (CO₂), entspricht. Die globale Mitteltemperatur wird selbst dann weiter ansteigen, wenn die Emission von Treibhausgasen sofort auf null heruntergefahren würde, da das Klimasystem aufgrund seiner Trägheit nur langsam auf die Veränderung der Treibhausgaskonzentrationen reagiert.

Da das Klima der Erde ein nichtlineares System von sehr hoher Komplexität ist, so dass der sprichwörtliche Schmetterlingsflügel Schlag in China einen Wirbelsturm in Amerika auslösen könnte, ist die globale *Temperaturentwicklung* auf sehr schwer vorhersagbare Weise mit anderen *Klimaphänomenen* verbunden.

Abgesehen

- von der Unsicherheit zukünftiger Klimaentwicklung, die aus der Komplexität und unseres teilweise mangelhaften Verständnisses des Systems entsteht,
- insbesondere auf Zeitskalen, die über die nächsten 20 Jahre hinausgehen,
- ist der Mensch der größte Unsicherheitsfaktor.

Denn für die Entwicklung des Klimas in den nächsten 50 bis 100 Jahren ist es entscheidend, wie viele Treibhausgase in der Atmosphäre angereichert werden. Das bedeutet, der Klimawandel der nächsten 20 Jahre hängt im Wesentlichen von der Antwort des Klimasystems auf die bereits in der Atmosphäre befindliche Konzentration von Treibhausgasen aus der Vergangenheit ab.

Die größten Unsicherheiten für deren Vorhersage liegen daher in der *internen Variabilität* des Klimas als chaotisches System und unseren Fähigkeiten, dieses zu modellieren. Für alle Vorhersagen, die über diesen kurzen zwanzig- bis dreißigjährigen Zeitraum hinausgehen, ist der größte Unsicherheitsfaktor jedoch, wie viele Treibhausgase weiterhin emittiert werden.

Um trotz dieser wesentlich von wirtschaftlichen und politischen Entwicklungen abhängigen Unsicherheiten Abschätzungen über die Zukunft machen zu können, entwickeln WissenschaftlerInnen so genannte Emissionsszenarien, denen unterschiedliche Annahmen über die

ökonomischen und politischen Entwicklungen und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen zugrunde liegen. Alle Szenarien über die zukünftige Entwicklung des globalen Klimasystems hängen von dem zugrunde liegenden Emissionsszenario ab.

Der internationale Beirat zum Klimawandel (IPCC) gibt in regelmäßigen Abständen Berichte über den neuesten Stand wissenschaftlicher Erkenntnis zum Klimawandel heraus. Kernstück dieser Berichte sind Projektionen der zukünftigen globalen Temperaturentwicklung, auf denen alle Abschätzungen möglicher ökologischer, ökonomischer und sozialer Folgen basieren und die sich ihrerseits auf Szenarien möglicher zukünftiger Emissionen von Treibhausgasen beziehen. Der letzte dieser Berichte erschien 2007, der nächste – der fünfte Sachstandsbericht – wird im Jahr 2013 veröffentlicht. Der aktuelle Report, ebenso wie sein Vorgänger aus dem Jahr 2001, verwendet Emissionsszenarien, die in einem gesonderten Bericht (Special Report on Emission Scenarios (SRES)) ebenfalls vom IPCC herausgegebenen wurden. Für den kommenden Bericht gibt es aktualisierte Szenarien, die sogenannten repräsentativen Konzentrationspfade (representative concentration pathways, RCP), die die mögliche zukünftige atmosphärische Konzentrationen von Treibhausgasen sowie auch direkte Emissionen enthalten und die bisherigen Szenarien ergänzen bzw. ersetzen.

Der wichtigste Unterschied zwischen den SRES-Szenarien und den RCP-Szenarien zukünftiger Treibhausgasemissionen ist die Berücksichtigung aktiver Klimapolitik in den neuen Szenarien. Daher geben diese ein realistischeres Bild globaler wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Entwicklungen ab als die SRES-Szenarien.

2 Aufbau und Auswahl von Emissionsszenarien

Um ein möglichst breites Spektrum möglicher zukünftiger Emissionspfade abzudecken, wurden im SRES vier Szenarien-Familien entwickelt: A1, A2, B1 und B2.

Abb. 1: Szenarienfamilien

	globalisierungsorientiert	Regionalisierungsorientiert
wachstumsorientiert	A1 <i>(variiert in: A1F1 / A1T / A1B)</i>	A2
ressourcenschonend orientiert	B1	B2

A-Szenarien

Die A1-Szenarien, die eine sich zunehmend global vernetzende Welt mit raschem Wirtschaftswachstum und ebenfalls raschem Bevölkerungsanstieg beschreiben, der in der Mitte des 21. Jahrhunderts seinen Höhepunkt erreichen wird, sind dabei noch einmal unterteilt.

- Während im A1FI-Szenario das Wirtschaftswachstum im Wesentlichen auf die Nutzung *fossiler Energieträger* gründet,
- beruht das Wachstum im A1T-Szenario auf technischen Lösungen des Energieproblems, die *unabhängig von fossilen Energieträgern* sind und
- nutzt *ausgewogen alle möglichen Quellen der Energiegewinnung* im A1B-Szenario.

Im Gegensatz dazu beschreiben die A2-Szenarien eine Welt, die regional sehr unterschiedlich ist und viele autarke, aber *weniger international miteinander vernetzte Wirtschaftssysteme* beinhaltet. Das Bevölkerungswachstum nimmt langsamer (wenn auch stetig) als im A1-Szenario zu, ebenso wie das Wirtschaftswachstum und die Entwicklung neuer Technologien.

B-Szenarien

Die B1-Szenarien beschreiben eine ähnliche Welt wie A1, aber mit einer sehr schnellen Entwicklung der Wirtschaft hin zu einer Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft mit geringem Energie- und Materialverbrauch.

- Auf globaler Ebene entwickelt sich die B1-Welt zu einer nachhaltigen Gesellschaft, *ohne dass jedoch zusätzliche politische Maßnahmen* zur Reduktion von Treibhausgasemissionen durchgeführt werden.
- Die B2-Szenarien beruhen auf der Annahme einer *regional ausgerichteten, nachhaltigen* Welt. Die Bevölkerung wächst nur langsam, ebenso wie die Wirtschaft, und ist von technologischem Fortschritt auf lokaler Ebene geprägt.

Die meisten Treibhausgase werden in der A1FI-Welt emittiert, die wenigsten in der B2-Welt. Diesen hypothetischen gegensätzlichen Welten entsprechen die modernen Szenarien RCP8.5 und RCP3.

Die RCP-Szenarien

Da keine der Familien die Umsetzung klimapolitischer Ziele implementiert, wurden die RCP-Szenarien entwickelt, um die Szenarien-Welten mit möglichen Entwicklungen der realen Welt zu assoziieren.

- Das RCP8.5-Szenario entspricht einer Welt, in der keinerlei Maßnahmen zum Klimaschutz unternommen werden und das Wirtschaftswachstum wie bisher auf der Verbrennung fossiler Energieträger beruht. Dieses Szenario wird daher häufig als „*business as usual (BAU)*“-Szenario bezeichnet, da es etwa den Emissionspfad beschreibt, den wir mit unserem bisherigen auf energieintensivem Wachstum ausgerichteten Wirtschaftsmodell beschreiten. Damit gehört dieses Szenario in die A1-Welt. Basierend auf diesem Szenario wird ein globaler Temperaturanstieg von 3,4 bis 5,5 Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert, verglichen mit der globalen Mitteltemperatur 1980-1999. Der Name des Szenarios leitet sich von einem geschätzten, maximalen Strahlungsantrieb von 8.5 W/m^2 im Jahr 2100 her.
- Schwieriger ist die Einordnung der RCP6- und RCP4.5-Szenarien in die Szenarienfamilien, obwohl diese die wohl realistischsten Emissionspfade widerspiegeln. Auf politischer Ebene entsprechen beide der A1- bzw. B1-Szenarienfamilie. Diese Szenarien stellen Emissionspfade da, die wir – als aufgeklärte Weltgesellschaft – verfolgen würden, wenn die z.B. im Kyoto-Abkommen und nachfolgend vereinbarten Ziele global umgesetzt würden. Die Zahlen 6 und 4.5 beziehen sich wiederum auf den erwarteten Strahlungsantrieb im Jahr 2100, wobei der niedrigere Wert das ehrgeizigere Einsparungsziel der Treibhausgasemissionen repräsentiert. Das RCP4.5 Szenario führt zu einer geschätzten Erwärmung von 2°C und stellt damit den von der Weltgemeinschaft derzeit angestrebten Emissionspfad dar.
- Der vierte repräsentative Emissionspfad des Szenarios RCP3 entspricht dem eher utopischen Fall eines maximalen Strahlungsantriebs von 3 W/m^2 im Jahr 2100 und einem in den folgenden Jahren nachlassendem Strahlungsantrieb. Ein solcher Emissionspfad wäre nur zu erreichen durch den sofortigen Stopp aller Treibhausgasemissionen.

Abb. 2: RCP-Szenarien

Szenarien	Geschätzter Temperaturanstieg im Jahr 2100 (Referenzzeitraum 1980-1999)	Geschätzter Temperaturanstieg im Jahr 2200 (Referenzzeitraum)
Herkömmlich (stark) wachstumsorientiert (RCP8.5)	3,4 bis 5,5 Grad Celsius	6,4 bis 9 Grad Celsius
ressourcenschonender orientiert (RCP4.5)	1,5 bis 2,5 Grad Celsius	1,6 bis 2,7 Grad Celsius
sofortige Stabilisierung (RCP3)	0,7 bis 1,4 Grad Celsius	0,6 bis 1,2 Grad Celsius

Im Folgenden werden in diesem Beitrag Wesen und Auswirkungen zweier Klimaszenarien vorgestellt. Gewählt wurde

- auf der einen Seite ein Klimaszenario basierend auf dem „*business as usual*“-Szenario (RCP8.5),
- auf der anderen Seite ein Szenario, dass eine Welt repräsentiert, in der *Klimapolitik erfolgreich implementiert (RCP4.5)* wurde, so dass die Erwärmung im Mittel bei etwa 2° C liegt.

3 Szenario „Business as usual“ – Weiter wie bisher

Das Klimasystem unserer Erde ist ein sehr komplexes, nichtlineares System. Das bedeutet, dass kleine Änderungen sehr große Auswirkungen haben können, die nicht einfach vorher-sagbar sind.

Allerdings basiert das dynamische, nichtlineare Klimasystem mit seiner Vielzahl verschiedener „Flüsse“ von Treibhausgasen, Wärme, Wasser, etc. auf einem *thermodynamischen System*. Dieses repräsentiert im Wesentlichen die Energiebilanz der Erde, und dessen zukünftiger Zustand kann recht genau vorhergesagt werden. Auf großen räumlichen Skalen erkennen wir, dass die Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Erdatmosphäre zu einer Erwärmung der Erde führt und dass diese Erwärmung zu den Polen hin (Nord- und Südpol) sehr viel stärker ist als am Äquator.

Auch einige Folgen dieser Erwärmung kennen wir, so ist es z.B. sehr sicher, dass der Meeresspiegel ansteigen wird. Auf lokaler Ebene kann eine globale Erwärmung allerdings auch zu einer Abkühlung führen, wenn sich beispielsweise atmosphärische oder ozeanische Strömungssysteme verschieben. Auch die Änderungen des lokalen Niederschlags in einer wärmeren Welt sind sehr schwer vorherzusagen.

KlimawissenschaftlerInnen haben jedoch eine Reihe von Prozessen und Teilsystemen innerhalb des Klimasystems identifiziert, die besonders sensibel in Bezug auf kleine Änderungen sind und deren Veränderung gravierende Auswirkungen für das gesamte System haben. Da sich diese Prozesse *nicht gleichmäßig* mit steigender Erwärmung verändern, sondern ab einer bestimmten Schwelltemperatur rapide „umkippen“, werden sie Kippelemente genannt.

Ein Szenario, das ein „weiter wie bisher“ repräsentiert und im Folgenden als BAU-Szenario vorgestellt wird, sollte keineswegs als „Worst-Case Szenario“ interpretiert werden. Es versucht vielmehr, wesentliche Veränderungen des Klimasystems aufgrund der anthropogenen globalen Erwärmung in einer Welt zu zeigen, wie sie *wahrscheinlich* aussehen wird, wenn sich an der derzeitigen Rate globaler Treibhausgasemissionen nichts ändern wird.

Das bedeutet, dass alle Angaben Annahmen bezüglich eines Durchschnittswertes der in Modellen projizierten Temperaturerhöhung und anderer Variablen sind.

Die Angaben entsprechen daher dem, was WissenschaftlerInnen aufgrund von physikalischen Gesetzmäßigkeiten, Klimamodellierungen und ihrer Erfahrung für wahrscheinlich halten. Wegen der nicht quantifizierbaren Unsicherheiten im System entspricht dies jedoch keinen statistischen Wahrscheinlichkeiten.

3.1 Kippelemente

Kippelemente sind ein Beispiel für besonders deutliche nichtlineare Effekte, da kleine Änderungen in der globalen Temperatur zu radikalen Veränderungen ganzer Subsysteme des Klimasystems führen können.

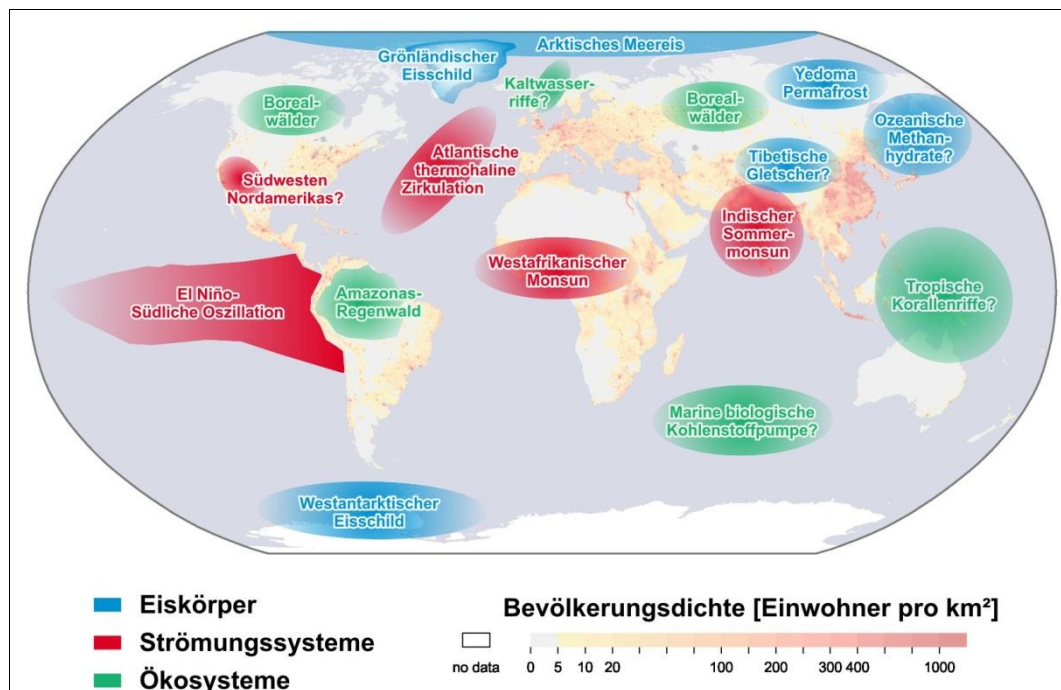
Um diese etwas ungenaue Definition besser einzugrenzen, muss für ein Kippelement außerdem gelten,

- dass es von mindestens subkontinentaler Ausdehnung ist,

- dass die es beeinflussenden Faktoren zu einer einzigen Größe (z.B. Temperatur) zusammengefasst werden können und
- dass ein kritischer Wert dieser Größe (der Kippunkt) existiert, der nach einer gewissen Beobachtungszeit zu einer qualitativen Änderung wesentlicher Merkmale des Prozesses führt.

Abbildung 3 zeigt einige klimatische Subsysteme, die entweder auf der langen „Liste der Verdächtigen“ oder der relativ kurzen Liste der politikrelevanten Kandidaten für Kippelemente stehen. Letztere sind mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Kippelement und insbesondere bei einer drastischen globalen Temperaturerhöhung relevant.

Abb. 3: Geografische Einordnung der wichtigsten Kippelemente



Geografische Einordnung der wichtigsten Kippelemente im Erdsystem mit Angabe der Bevölkerungsdichte. Die Kippelemente lassen sich in drei Klassen einteilen: schmelzende Eiskörper, sich verändernde Strömungssysteme der Ozeane und der Atmosphäre und bedrohte Ökosysteme von überregionaler Bedeutung. Fragezeichen kennzeichnen Systeme, deren Status als Kippelement wissenschaftlich noch nicht gesichert ist. <http://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente>

Da ein wichtiges Merkmal der Kippelemente die räumliche Ausdehnung ist, gehören insbesondere Klimaprozesse, die auf sehr großen Skalen reagieren (wie die Meeresströmungen und die großen Eisschilde an Nord- und Südpol) zur Liste der „Verdächtigen“, die von der Erderwärmung in besonderem Maße betroffen sein werden.

3.2 Globale Auswirkungen

Abschmelzen von Eiskörpern

Zu den „heißen“ Kandidaten, die mit großer Wahrscheinlichkeit im „business as usual“-Ansatz kippen, gehören der große Grönland bedeckende Eisschild ebenso wie der Westantarktische Eisschild. Zusammen mit dem Schmelzen der kontinentalen Gletscher führt das Abschmelzen dieser Eisschilde zu einem starken Anstieg des globalen Meeresspiegels. Würden beide Eisschilde tatsächlich komplett abschmelzen, würde so viel Wasser zusätzlich in die Ozeane fließen, dass der Meeresspiegel 13 Meter ansteigen könnte – ein Szenario, dessen Folgen nicht abzusehen sind. Der Anstieg würde sich allerdings über mehrere Jahrhunderte vollziehen.

Unter einem „business as usual“-Szenario ist es jedoch nicht unwahrscheinlich, dass der Meeresspiegel um zwei Meter bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ansteigt. Da das Wasser einerseits Zeit braucht, bis es sich über den ganzen Globus verteilt, und außerdem Gravitationseffekte der Eismassen das Wasser quasi festhalten, führt ein Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes zu einem noch höheren Anstieg des *regionalen Meeresspiegels*, der unter anderem die großen nordostamerikanischen Hafenstädte bedroht.

Wenn der Klimawandel mit gleicher Geschwindigkeit fortschreitet, wird ein Großteil der kontinentalen Gletscher zum Ende dieses Jahrhunderts abgeschmolzen sein. Dies trägt einerseits zu einem Anstieg des Meeresspiegels bei, bedroht aber gleichzeitig die *weltweite Trinkwasserversorgung*. Die Frischwasserversorgung beispielsweise eines Viertels der Weltbevölkerung hängt am *Schmelzwasser der Gletscher* im Himalaya-Gebirge in Asien. Wenn die Flüsse, die von diesen Gletschern gespeist werden, nicht mehr ausreichend Wasser führen, ist außerdem die Landwirtschaft und somit die Ernährung der Bevölkerung in dieser Region bedroht.

Unter extremen globalen Erwärmungsszenarien – die aktuellen globalen Emissionen sind so hoch wie im Extremszenario 2000 projiziert –, ist auch das *Auftauen insbesondere sibirischer Permafrostböden* ein mögliches Kippelement. Neben den Problemen, die das Absacken sämtlicher auf diesen Böden befindlicher Bebauung für die Bevölkerung mit sich bringt, würde dies in globalem Maßstab zu einer Verstärkung des Klimawandels führen, da bis zu 10,3 Gigatonnen (Gt) des darin gespeicherten Kohlendioxids und Methans pro Jahr in die Atmosphä-

re freigesetzt würden. Was ungefähr dem aktuellen jährlichen Treibhausgasausstoß der USA entspricht.

Absterben von Wäldern

Eine weitere Gruppe möglicher Kippelemente ist das Absterben großer *Wälder*, insbesondere der borealen Nadelwälder in Eurasien (z.B. Tundra), Kanada und des Amazonas-Regenwaldes. Mit den Wäldern würden eine riesige Anzahl Tier- und Pflanzenarten sterben, außerdem würde es zu einer stark erhöhten Wald- und Steppenbrandgefahr führen. Was dies für die Ökosysteme bedeuten könnte, kann bereits in Westkanada beobachtet werden, wo eine Schädlingsinvasion und eine signifikante Zunahme von Waldbränden den Baumbestand erheblich schädigt.

Veränderung von Strömungssystemen

Kippelemente, bei denen am deutlichsten zu erkennen ist, dass sie von einem zum anderen Zustand kippen, sind solche, die große *Strömungsmuster in Atmosphäre und Ozean* verändern. Ein weit ausgedehntes und für das Weltklima bedeutendes Zirkulationsmuster ist die El Niño-Oszillation, die zum Auftreten des El Niño- bzw. La Niña-Phänomens führt. Normalerweise fließt warmes Wasser von der Südamerikanischen Küste nach Südostasien, in El Niño-Jahren kehrt sich diese Strömung um. Außerdem bricht der Humboldt-Strom vor der Westküste Südamerikas zusammen, so dass die *Nahrungskette* aufgrund des geringeren Sauerstoffgehalts des wärmeren Wassers massiv leidet.

In La Niña-Jahren sind die normalen Strömungsmuster verstärkt. Diese veränderten Strömungen beeinflussen das Wettergeschehen auf einem Großteil des Kontinents, da sich u.a. die Passatwinde verschieben, so dass der Regen, den sie mitbringen, in anderen Gebieten fällt, was beispielsweise zu *Überschwemmungen* an der Südamerikanischen Küste und Trockenheit im Amazonas führt. Der Wechsel von El Niño, La Niña und gewöhnlichen Jahren ist ein natürliches Klimaphänomen, dessen Amplitude und Frequenz aber möglicherweise ein Kippelement ist. Aktuelle Studien liefern Hinweise, dass bei einer globalen Erwärmung von 3-6° C die Stärke des Phänomens deutlich zunehmen kann.

Klimazonen

In extremen Klimaszenarien, wie sie das BAU-Emissionsszenario liefert, ist die Wahrscheinlichkeit recht hoch, dass *mindestens ein Kippelement* tatsächlich komplett kippt. In einer sich

schnell erwärmenden Welt würde sich damit die Einteilung der Klimazonen auf der Erde und damit die Lage der Äquatorialen Tiefdruckrinne gravierend ändern. Diese Tiefdruckrinne oder innertropische Konvergenzzone (ITCZ) ist quasi die mittlere Klimazone, an die sich jeweils nach Norden und nach Süden

- der subtropische Hochdruckgürtel mit den Passatwinden,
- die gemäßigten Breiten mit sehr unterschiedlichem Wetter,
- die subpolare Zone mit oft ruhigem Hochdruckwetter und
- die Zone polaren Dauerfrosts anschließt.

Diese Zonen entstehen aufgrund der unterschiedlichen Sonneneinstrahlung und sind Wetter und Klima bestimmend. Das Leben in den jeweiligen Zonen hat sich über viele Jahrhunderte dem örtlichen Klima angepasst, eine Verschiebung dieser Zonen hätte daher für uns alle gravierende Auswirkungen.

Beispiel Golfstrom: Der Golfstrom ist ein Ausläufer der Nordatlantikströmung, die wiederum ein Teil der thermohalinen Zirkulation ist, dem „Förderband“, mit dem warmes Wasser vom Äquator zu den Polen transportiert wird, dort absinkt und als kaltes Tiefenwasser zurückbefördert wird. Diese Nordatlantikströmung bringt warmes Wasser aus dem Golf von Mexiko via Atlantik an die Westküsten Europas und ist damit für das vergleichsweise milde Klima Westeuropas verantwortlich.

Es ist wissenschaftlich erwiesen, dass das derzeit vorherrschende Strömungsmuster nicht der einzig stabile Zustand dieser ozeanischen Strömungen ist. Ein Abbruch dieser nordatlantischen Zirkulation würde – stark vereinfacht ausgedrückt – die Tiefenwasserbildung und damit die gesamten Ozeanströmungen stark verändern und auch die Vegetationszonen Europas nach Süden verschieben.

Es gibt Modellrechnungen, die - bei starker Erwärmung - über den amerikanischen Kontinenten eine Verschiebung insbesondere der Niederschläge nach Norden auf der Nordhalbkugel und nach Süden auf der Südhalbkugel zeigen. Das bedeutet, dass sowohl die landwirtschaftlich geprägten Gebiete im Mittleren Westen Nordamerikas als auch der Amazonas-Regenwald von sich ausbreitenden Wüsten bedroht sind.

Niederschläge

Niederschlagsänderungen spielen eine zentrale Rolle in Bezug auf die Folgen des Klimawandels. Im Durchschnitt wird erwartet, dass mit steigenden globalen Temperaturen auch die Niederschläge zunehmen, allein aufgrund der physikalischen Tatsache, dass bei höheren Temperaturen mehr Wasser verdunstet und eine wärmere Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen kann. Allerdings zeigen Modelle, dass dieser Anstieg nicht linear mit der Temperatur erfolgt und auch nicht konstant über die Zeit ansteigt. Der Grund dafür ist hauptsächlich, dass Niederschläge, anders als die globale Mitteltemperatur, stark von der atmosphärischen Zirkulation abhängen, der Verbreitung und Entwicklung von Hoch- und Tiefdruckgebieten. Diese verändert sich mit steigenden Temperaturen auf schwer vorhersagbare Weise. Das bedeutet, dass Niederschläge kurzfristig oder regional zunehmen, auf längeren Zeitskalen und in anderen Regionen aber abnehmen können. Während Klimamodelle die globale Temperaturentwicklung gut repräsentieren, gilt dies daher nicht für Niederschläge.

Um lokale Veränderungen in den Kontext des Klimawandels einordnen zu können, müssen regionale Klimamodelle entwickelt und deren Ergebnisse mit den globalen Projektionen gemeinsam interpretiert werden. Im Rahmen eines BAU-Szenarios nehmen Extremereignisse, sowohl extreme Regenfälle als auch Dürren, deutlich zu. Der Grund dafür ist zu einem großen Teil, dass sich wiederkehrende Regenregime – wie es sie hauptsächlich in den Tropen und Subtropen gibt – verschieben, so dass sich in Gebieten, in denen es viel regnet, der Niederschlag noch verstärkt, wohingegen in ohnehin dürregeplagte Gebiete noch weniger Regen fallen wird.

Ganz konkret heißt das für das BAU-Szenario im letzten veröffentlichten Bericht des Weltklimarates:

- Bis zu 50% mehr Regen in Teilen des tropischen Regenwalds, im Norden Russlands, in China und in Kanada.
- Bis zu 50% weniger Regenfälle über der Sahelzone und Südafrika, in Südeuropa, auf der arabischen Halbinsel und über Mittelamerika, was teilweise den Regenwald dort einschließt.
- Der gesamte australische Kontinent wird ebenfalls mit bis zu 50% weniger Regenfällen bis zum Jahr 2100 rechnen müssen.

Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen gibt es außerdem noch andere menschengemachte Klimaveränderungen. Insbesondere für regionale Klimaveränderungen, und dazu gehören in erster Linie Niederschläge, spielen diese eine entscheidende Rolle.

Ein Beispiel für menschengemachten Klimawandel, der unabhängig von Treibhausgasemissionen ist, und gleichzeitig ein Beispiel für erfolgreiche Klimapolitik liefert, ist die Entstehung des Ozonlochs durch die starke Verbreitung von Fluorkohlenwasserstoffen (FCKW), die nach dem Klimaabkommen von Montreal 1987 erfolgreich eingedämmt wurden. Die Ozonschicht über der Antarktis wird seither wieder dicker.

Die Verbrennung von Energieträgern setzt nicht nur Treibhausgase frei, sondern vor allem auch Ruß. Dieser schwarze Ruß und andere kleine Teilchen aus Abgasen beeinflussen das Klima als Aerosole erheblich, insbesondere über Gebieten mit vielen Industrie- und wenigen Filteranlagen. Die Aerosole dienen als Kondensationskeime für Wassertröpfchen und wirken damit auf die Wolkenbildung ein, darüber hinaus beeinflussen sie die lokale Strahlungsbilanz, indem sie, je nach Aerosoltyp, entweder langwellige Strahlung vom Erdboden oder kurzwellige Sonnenstrahlung reflektieren.

Der indische Sommermonsunregen ist im Allgemeinen extrem regelmäßig und beginnt zuverlässig jedes Jahr im Juni oder Juli, abhängig von der jeweiligen Region. Aktuelle Beobachtungen zeigen allerdings eine Abnahme des sommerlichen Monsunregens, die auf die sogenannten „atmosphärischen braunen Wolke“ zurückzuführen ist, einer Dunstglocke aus schwarzem Ruß und Sulfataerosolen, die aus den Schornsteinen der Industriegebiete Indiens und insbesondere Chinas kommt. Diese Aerosole verändern die lokale Sonneneinstrahlung und damit einen Antrieb des Monsunregens. Sollte die braune Wolke sich über den gesamten indischen Kontinent hin ausdehnen, könnte das zu einem vollständigen Zusammenbruch des indischen Monsuns und damit zum Ausbleiben der Regenfälle führen.

Ein solcher Zusammenbruch hätte katastrophale Folgen für Indien und Südostasien insgesamt, da die Landwirtschaft auf dem Subkontinent vom Monsun abhängt. Dürren und Hungerkatastrophen von dramatischem Ausmaß wären die Folge. Ein solches Szenario, zusammen mit der in jedem Fall weniger verlässlichen Trinkwasserversorgung durch die Flüsse des Himalayas, würde Landwirtschaft in großen Teilen Indiens unmöglich machen.

Der indische Monsun ist damit ein Kippelement, dessen Kipppunkt nicht von einer bestimmten Temperaturschwelle, sondern von der Art und Ausdehnung des regionalen Aerosolausstoßes abhängt. Eine mögliche Verstärkung des Monsunregens durch die globale Erwärmung und die damit verbundenen Fluten sowie mögliche, katastrophale Dürren durch das Ausbleiben der Regenfälle sind eindruckliche Beispiele für die Sensibilität des Klimas gegenüber anthropogenen Einflüssen. Sie zeigen außerdem, dass Niederschlagsänderungen nicht nur von der globalen oder regionalen Temperaturveränderung abhängen, sondern auch von regionalen Rußemissionen und anderen lokalen Faktoren.

3.3 Bedeutung für Europa

Erwärmung

Die bisher erfolgte globale Erwärmung ist in Europa stärker wahrnehmbar als im weltweiten Durchschnitt und betrug 2009 etwa 1,3° C über der vorindustriellen Durchschnittstemperatur. Die neun wärmsten Jahre seit Beginn verlässlicher Temperaturlaufzeichnungen traten in den letzten zwölf Jahren auf, außerdem nahm die Zahl der Hitzewellen, Dürreperioden, heißer Tage und tropischer Nächte deutlich zu.

Die Temperaturerhöhung ist auch innerhalb Europas nicht gleichmäßig, da die größte Erwärmung im Winter in Nord- und Osteuropa erfolgt, während die projizierte durchschnittliche Sommertemperatur in Südeuropa am stärksten steigt.

Zu der *Erwärmung Südeuropas*, die in BAU-Szenarien auf durchschnittlich bis zu 7° C bis 2100 projiziert wird, wird eine Abnahme des jährlichen Niederschlags um bis zu 20% assoziiert. Im Gegensatz dazu nimmt der *Niederschlag im nördlichen Europa* in allen Szenarien um bis zu 40% zu.

Diese Zahlen zeigen, dass die Folgen eines dramatischen Klimawandels für Europa auf naturräumlicher Seite zwar nicht existentiell sind, insbesondere auf der Iberischen Halbinsel und dem Apennin würde man jedoch mit extremer Trockenheit und den sich daraus ergebenden Konsequenzen leben müssen.

Steigender Meeresspiegel

Ein Faktor, der auch das Leben in Europa erheblich verändern wird, ist der steigende globale Meeresspiegel. Laut der Szenarien des letzten Berichts des internationalen Klimabeirats steigt

dieser allerdings so langsam, dass er erst innerhalb von Jahrhunderten ein Problem wird. Neuere Studien legen jedoch nahe, dass der Betrag schmelzender großer Eisschilde an den Polkappen in diesen Berechnungen unterschätzt wurde.

Demnach müsste auch in Deutschland mit einem Meeresspiegelanstieg von bis zu einem Meter in diesem Jahrhundert gerechnet werden, wenn die Eisschilde im bisherigen Tempo weiterschmelzen. Für die Hafenstädte, insbesondere an der Nordsee, hätte das schwerwiegende Folgen.

Zusammengenommen wird die Lebensgrundlage der Menschen in Europa auch in einem wenig optimistischen Szenario nicht grundlegend bedroht. Für viele Tier- und Pflanzenarten gilt dies allerdings nicht. Modellrechnungen zeigen, dass in einem Klimaszenario mit starker globaler Erwärmung bis 2050 bereits 35% aller derzeit lebenden Tier- und Pflanzenarten ausgestorben sein könnten. Insbesondere Arten, die in kleinen ökologischen Nischen leben und damit eine geringe Anpassungsfähigkeit an veränderte Bedingungen haben, werden in einer erheblich wärmeren Welt in naher Zukunft aussterben.

Politische Folgen

Während den meisten klimatischen Veränderungen in Europa mit Anpassungsmaßnahmen, wie intelligenten Bewässerungssystemen und dem Ausbau von Deichen, zumindest auf menschlicher Seite begegnet werden kann, wird die größere Herausforderung für Europa jedoch in der umfänglichen Unterstützung und Lösung politisch-gesellschaftlich-ökonomischer Probleme bestehen. Denn es ist zu erwarten, dass viele Bewohner der Weltgegenden, die durch steigende Meeresspiegel, Trinkwasserknappheit und Wüstenbildung unbewohnbar werden, nach Europa migrieren wollen.

4 Szenario erfolgreicher Klimapolitik

4.1 Das 2° C-Szenario

Auch wenn die wichtigen globalen Verhandlungen über ein neues Klimaabkommen 2009 in Kopenhagen als gescheitert gelten können, gibt es doch seit der Verabschiedung des 2° C-Zieles in Cancun 2010 – und insbesondere auf regionaler Ebene und in Europa – Ansätze, Klimaschutzziele nicht nur zu definieren, sondern auch konkrete Maßnahmen zu ihrer Umsetzung zu ergreifen.

Der Beschluss in Durban 2011, ein neues internationales Abkommen zum Klimaschutz zu schaffen, darf vorsichtig optimistisch stimmen, dass der politische Wille zur Umsetzung des 2° C-Ziels vorhanden ist.

Es ist dennoch aus heutiger Perspektive nahezu unmöglich abzuschätzen, welche Emissions-Vermeidungsstrategien

- wie viel CO₂ tatsächlich *einsparen* und
- zu welcher *Temperaturerhöhung* dies dann genau führt.

Daher ist es wenig sinnvoll, ein konkretes ggf. regional realisierbares Emissionsszenario zur Grundlage erfolgreicher Klimapolitik zu machen, sondern eine globale Erwärmung von 2° C zur Grundlage des folgenden Abschnitts zu wählen und dem „business as usual“-Szenario gegenüber zu stellen.

Die Begrenzung der globalen Temperaturerhöhung auf 2° C ist eine *normative* Größe, die gewählt wurde, da die Chancen, dass die dramatischsten Folgen der globalen Erwärmung dann nicht eintreten, ganz gut stehen. Das Ziel, die Erderwärmung auf 2° C zu beschränken, wird daher auch als *Leitplankenansatz* bezeichnet.

Die Leitplanke an Straßen steht üblicherweise nicht direkt am Abgrund, sondern so weit weg, dass man annehmen kann, dass auch ein Auto, das ungebremst hineinfährt, so weit abgebremst wird, dass es nicht abstürzt. Der Unterschied ist nur, dass wir nicht wissen, wo der Abgrund ist, und dass wir auch so langsam fallen, dass wir es nicht unbedingt merken, wenn wir ihn schon erreicht haben.

Maßnahmen zum Klimaschutz sollen so ausgerichtet sein, dass die Wahrscheinlichkeit, die 2° C-Marke zu überschreiten, gering ist. Dieses Ziel ist gewählt, da das Risiko, bei einer stärkeren globalen Erwärmung große Schäden davonzutragen, von vielen WissenschaftlerInnen als sehr hoch bewertet wird. Das bedeutet aber auch, dass bei einer Erderwärmung von 2° C für einige Spezies und Naturräume sowie einen kleinen Teil der Weltbevölkerung die Folgen dramatisch sein werden.

Der Leitplankenansatz, die globale Erwärmung zu begrenzen, ist trotzdem ein ehrgeiziges Ziel, denn auch wenn er als Ziel inzwischen klar formuliert ist, ist seine Umsetzung unklar. Klar ist nur, dass das weltweite Wirtschaftssystem, das zum großen Teil von den Energiequel-

len Erdöl und Kohle abhängig ist, zu einem nachhaltigen System mit drastisch reduzierten globalen CO₂-Emissionen umgestellt werden muss.

Das Erreichen dieses 2-Grad-Ziels bedeutet, dass wir mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit *Klimawandel* erleben werden; es bedeutet aber auch, dass wir mit großer Wahrscheinlichkeit keine *Klimakatastrophe* erleben werden.

4.2 Sicherer Klimawandel

Seit Beginn der Industrialisierung hat sich die globale Mitteltemperatur um 0,8° C erhöht. Auch wenn diese Zahl nicht sehr groß scheint, bedeutet es, dass wir bereits jetzt ein wärmeres Klima haben als jemals in den letzten 1000 Jahren zuvor. Dieser Trend hält an.

Die Welt wird wärmer, unabhängig davon, ob und wie Maßnahmen zur Begrenzung der weltweiten Emissionen greifen, denn die Temperaturerhöhung ist, wie eingangs erwähnt, eine Antwort des Klimasystems auf die vorhandene Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre. Das bedeutet, dass wir uns mit den in der Vergangenheit ausgestoßenen Treibhausgasen auf eine Erwärmung eingelassen haben, die über den aktuellen Temperaturen liegt. Wenn das 2° C-Ziel ernsthaft erreicht werden soll, muss daher schnell gehandelt werden.

Obwohl alle von der Wissenschaft registrierten Folgen der globalen Erwärmung mit Unsicherheiten behaftet sind, spüren wir dennoch einige dieser Folgen schon jetzt und können sie eindeutig der globalen Erwärmung zuordnen, während bei anderen keine eindeutige Zuordnung möglich ist, da auch die *natürlichen Schwankungen im Klimasystem* zu extremen Ereignissen führen können. Das Risiko, dass Extremereignisse auftreten, ist in vielen Regionen der Welt jedoch messbar erhöht.

Meeresspiegelanstieg

Besonders stark ist die globale Erwärmung an den Polen, am Nordpol kann man dies durch das Schmelzen des Arktischen Meereises beobachten. Die Beobachtungen des Eisverlusts haben die Vorhersagen der letzten Jahre übertroffen. Das bedeutet, dass mehr Eis schmilzt als selbst unter den pessimistischsten Annahmen berechnet wurde.

Eine im Sommer eisfreie Arktis ist nicht nur für das dortige Ökosystem eine Katastrophe, sondern auch ein Faktor, der den globalen Klimawandel insgesamt beschleunigen wird. Der Grund dafür ist der sogenannte *Eis-Albedo Rückkopplungsmechanismus*. Wenn bisher kurz-

wellige Sonneneinstrahlung auf die Eisflächen der Arktis trifft, wird ein Großteil dieser Strahlung an der weißen Oberfläche reflektiert. An den Stellen, an denen das Eis geschmolzen ist und dunkler Untergrund zu Tage tritt, wird weniger Strahlung reflektiert und dafür mehr absorbiert, was zu einer Erwärmung der betroffenen Gebiete führt und damit das Schmelzen des Eises beschleunigt.

Ebenso wie die Temperatur kann man auch jetzt schon einen signifikanten Anstieg des globalen Meeresspiegels messen. Ursache dafür ist einerseits die Temperaturerhöhung selbst, denn wärmeres Wasser hat eine geringere Dichte und benötigt deshalb mehr Platz, andererseits schmilzt nicht nur das Eis auf dem Wasser, sondern auch das auf dem Land, insbesondere auf Grönland. Das dabei entstehende Schmelzwasser fließt in den Ozean.

Insbesondere in tiefliegenden Inselstaaten ist dieser Anstieg schon jetzt ein großes Problem, weshalb ihre Vertreter sich auf der Klimakonferenz in Kopenhagen für eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf nur 1,5° C eingesetzt haben. Ein Anstieg des Meeresspiegels ist aber nicht nur für kleine Staaten im Pazifik ein ernstes Problem, sondern bedroht auch viele wirtschaftliche Zentren der westlichen Welt und Asiens, die oft um Hafenstädte herum entstanden sind.

Um sich dem steigenden Meeresspiegel anzupassen und auf ein Scheitern des 2° C-Zieles vorbereitet zu sein, hat z.B. die niederländische Regierung *die Delta-Kommission* ins Leben gerufen. Diese schlug nicht nur Maßnahmen vor, um für die Zukunft gerüstet zu sein, sondern sieht auch jetzt schon an einigen Stellen der holländischen Küste Handlungsbedarf, um dem aktuellen Meeresspiegelanstieg durch die Verstärkung von Deichen und das Aufschütten künstlicher Sandstrände zu begegnen.

Extremereignisse

In den letzten Jahren, die die wärmsten seit Beginn der Temperaturlaufzeichnungen waren, konnte man häufig regionalspezifisch extreme Wetter-Ereignisse beobachten, wie z.B.

- die europäische Hitzewelle 2003,
- die russische Hitzewelle im Sommer 2010,
- starke Fluten an Oder und Elbe, aber auch in Pakistan oder in England.

Auch wenn es schwer ist, diese konkreten Ereignisse als vom anthropogenen Klimawandel verursacht zu identifizieren, ist eine solche Identifikation, *Attribution* genannt, in Ausnahmefällen schon gelungen. So kann man z.B. zeigen, dass eine Jahrhundertflut, wie sie theoretisch in einem Klima der 1960iger Jahre nur einmal in hundert Jahren zu erwarten ist, im Klima des Jahres 2000 alle 25 Jahre zu erwarten ist.

Unstrittig hingegen ist, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher Extremereignisse unter der globalen Erwärmung deutlich erhöht ist.

Wir werden in Zukunft in Mitteleuropa sehr viel häufiger einen heißeren und trockeneren Sommer erleben als in vergangenen Jahrhunderten. Wir werden uns aller Voraussicht nach auf neue Höchststände bzw. Negativrekorde bei Niederschlag, Hochwasser, Trockenheit und Temperaturen einstellen müssen.

Ebenso wie das Oderhochwasser oder die Jahrhundertflut an der Elbe diesen Namen nicht mehr verdienen werden, da solche Fluten alle paar Jahre auftreten werden. Eine Jahrhundertflut oder ein Jahrhundertsommer wird in der näheren Zukunft nur noch ein Jahrzehntsommer werden. Das Risiko ist ebenfalls sehr hoch, dass es neue Jahrhundertsommer geben wird, mit bisher noch nie erreichten Rekordtemperaturen. Das gleiche gilt für Niederschläge.

Da das Klimasystem sehr komplex ist und Prozesse auf allen Zeitskalen und räumlichen Skalen miteinander verbunden sind, bedeutet der Klimawandel gemäß des Zwei-Grad-Szenarios für Europa, und insbesondere Deutschland, nicht nur wärmere Sommer, sondern auch eine Erhöhung des Risikos für kalte Winter. Es wird angenommen, dass sich die atmosphärischen Zirkulationssysteme so verschieben, dass im Winter vermehrt sibirische Kaltluft in große Gebiete Europas strömt und damit zu kalten und durch die allgemeine Erhöhung der Winterniederschläge in Europa schneereichen Wintern mit ihren erheblichen Folgen für die Infrastruktur führt.

4.3 Verminderte Risiken durch erfolgreiche Klimapolitik

Risiko ist - per definitionem - die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ereignisses multipliziert mit den Schäden, die durch das Auftreten verursacht werden.

Wenn man daher die Größenordnung der Wahrscheinlichkeit kennt, kann man mit relativer Sicherheit sagen, ob das Risiko sich erhöht oder verringert. Das bedeutet, dass das Risiko des

Kippens der Kippelemente, welches im BAU-Szenario sehr groß ist, bei einer auf 2° C begrenzten Erderwärmung nur ein geringeres Risiko darstellt.

Die Kippelemente sind deshalb so wichtig, weil ihr Kippen einen Wandel kompletter Subsysteme des Klimasystems mit sich bringt, was katastrophale Auswirkungen haben kann - wie einen extremen Anstieg des Meeresspiegels oder den Abbruch der Monsunzirkulation.

Das Erreichen des Zwei-Grad-Ziels verringert das Risiko einer globalen Klimakatastrophe drastisch.

Das bedeutet aber auch, dass das Erreichen des 2° C-Zieles nicht nur Maßnahmen erfordert, die Treibhausgasemissionen zu verringern und damit den Klimawandel auf ein für den Großteil der Menschheit und Naturräume zu begrenzen, sondern gleichzeitig auch Maßnahmen, um sich an ein sich wandelndes Klima anzupassen.

Erfolgreiche Klimapolitik kann das Risiko, schwere Schäden zu erleiden, verringern, indem man das Ausmaß der Schäden durch Deichausbauten, Renaturalisierung von Flüssen, intelligente Bewässerungssysteme etc. verringert. Hitzewellen und schneereiche Winter sind verbunden mit dem Zusammenbrechen bzw. eingeschränkter Funktionalität der Infrastruktur und vielen Toten.

Wenn solche Ereignisse alle zwanzig Jahre auftreten, wie es bei einer globalen Erwärmung um zwei Grad wahrscheinlich ist, können wir – ökonomisch wie psychologisch – die Folgen (er-)tragen und uns ein Stück weit daran anpassen. Wenn wir jedoch das BAU-Szenario zulassen, wird der *Ausnahmezustand der Normalzustand* und man könnte von einer globalen Klimakatastrophe sprechen.

Wenn wir, als globale Gesellschaft, uns jetzt tragfähige Lösungen für eine nachhaltige *Energieversorgung* und eine krisenfeste *Infrastruktur* überlegen, stehen die Chancen gut, dass der Klimawandel mit seinen vielfältigen und heute nicht überschaubaren Auswirkungen auf ein erträgliches Maß begrenzt werden kann, der unseren hohen Lebensstandard nicht zerstört, sondern zu weniger Ressourcenverbrauch bei hoher Lebensqualität modifiziert.

Allerdings wird dies unter Umständen ein Leben ohne Korallenriffe sein, denn für viele andere, vielleicht noch unentdeckte Spezies, sind die Grenzen ihrer Anpassungsfähigkeit überschritten. Je mehr uns daher nicht nur an unserer eigenen Spezies, sondern auch an der Exis-

tenz der anderen gelegen ist, desto mehr müssen wir uns beeilen, die Weichen in Richtung nachhaltige Gesellschaft zu stellen.

Textveröffentlichung: April 2012

Dr. Friederike Otto ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Environmental Change Institute der Universität Oxford in Großbritannien. Sie studierte Physik und Philosophie an der Universität Potsdam und schloss das Studium 2007 mit dem Diplom in Physik ab. Anschließend promovierte sie im Fach Philosophie an der Freien Universität Berlin mit einer wissenschaftstheoretischen Arbeit zu Klimamodellen. Von 2006 bis 2007 arbeitete sie am Alfred-Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung und von 2007 bis 2011 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Seit 2011 arbeitet sie in einem Projekt zur Quantifizierung von Unsicherheiten in Klimaprojektionen an der Universität Oxford. Friederike lebt mit ihrem Mann und ihrem zweijährigen Sohn in Oxford, UK.

Bibliographie

Frieler, K., M. Meinshausen, T. Schneider von Deimling, T. Andrews and P. Forster (2011) *Changes in global mean precipitation in response to warming, greenhouse gas forcing and black carbon*. Geophysical Research Letters, 38:L04702.

Lenton, T. A. Footit and A. Dlugolecki (2009) *Major Tipping Points in the Earth's Climate System and Consequences for the Insurance Sector*. WWF - World Wide Fund for Nature (formerly World Wildlife Fund), Gland, Switzerland and Allianz SE, Munich, Germany.

Meinshausen, M. et al (2011) *The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300*. Climatic Change, 109:213–241.

Nakicenovic, N. and R. Swart (Eds.) (2000) *Special Report on Emission Szenarios*. Cambridge University Press, UK.

Otto, F. E. L., N. Massey, G. J. van Oldenborgh, R. G. Jones, and M. R. Allen (2012) *Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave*. Geophysical Research Letters, 39.

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007) *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Sondergutachten des WBGU (2009) *Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz*. WBGU, Berlin.
Rahmstorf, S. (1995) *Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle*. Nature, 378:145-149.

Rahmstorf, S. und D. Coumou (2011) *Increase of extreme events in a warming world*. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America (PNAS) Early edition.

Thomas, C. D et al. (2004) *Extinction risk from climate change*. Nature, 427:145-148.

Rogelj, J., M. Meinshausen und R. Knutti (2012) *Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates*. Nature Climate Change, Advance online publication. DOI:10.1038/NCLIMATE1385 .