

KLIMAÄNDERUNGEN UND NEUE WETTEREXTREME

Hartmut Graßl

Meteorologisches Institut, Universität Hamburg
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

1. Einleitung

Das Klima der Erde ist für uns eine wichtige natürliche Ressource, die allerdings auf allen Zeitskalen von Monaten bis Milliarden von Jahren zum Teil recht stark schwankt. Als Synthese des Wetters enthält die Klimastatistik eines mindestens einige Jahrzehnte umfassenden Zeitabschnittes die Wetterextreme in den Flügeln der Häufigkeitsverteilungen bestimmter Klimavariablen, z.B. des Niederschlags oder der Temperatur. Diese Wetterextreme bestimmen, ja beherrschen unsere Infrastruktur. Bauvorschriften, die Höhe von Dämmen und Deichen, die Tiefe von Wasserleitungen im Boden und vieles mehr sind einmal an früher beobachtete Klimaschwankungen besser oder schlechter angepasst worden. Wenn die Häufigkeitsverteilungen der Klimaparameter sich allerdings durch langfristige Klimaänderungen oder Klimaschwankungen verschieben und vielleicht sogar breiter werden, ist unsere sicherheitsrelevante Infrastruktur nicht mehr angepasst und wetterbedingte Katastrophen werden häufiger auftreten.

Im Folgenden wird zuerst über beobachtete Klimaänderungen in der jüngeren Vergangenheit berichtet, z.B. den Temperaturanstieg an der Erdoberfläche, den Gletscherschwund, den Meeresspiegelanstieg und die Veränderungen der Niederschlagsvariabilität. Anschließend werden die physikalischen Argumente für neue Wetterextreme bei Klimaänderungen behandelt, ehe über die beobachteten veränderten Extreme und das Fehlen harter wissenschaftlicher Argumente für die Einführung des sogenannten hundertjährigen Ereignisses gesprochen wird. In sogenannten Szenario-Rechnungen wird danach über projizierte neue Niederschlagsextreme bei vorgegebenem menschlichem Verhalten berichtet, die anregen, abschließend über politische Maßnahmen zu sprechen, die bisher von den Vereinten Nationen ergriffen worden sind, um die Klimaänderungsrate durch den Menschen zu dämpfen und damit die Anpassungsfähigkeit an Änderungen zu steigern.

Dies führt notwendigerweise zu einer Debatte über die zukünftige Energieversorgung der Menschheit. Da das Klimasystem verzögert auf Störungen reagiert, wird abschließend vom notwendigen Mix zwischen lokaler Anpassung an nicht mehr vermeidbare Änderungen und globaler Aktion zur Dämpfung der anthropogenen Klimaänderungsrate gesprochen. Letztere soll, so ist es völkerrechtlich verbindlich festgelegt, so klein bleiben, dass eine gefährliche Störung des globalen Klimas durch den Menschen vermieden wird. Denn das ist sicherlich für die Annäherung an eine nachhaltige Entwicklung Voraussetzung.

2. Beobachtete Klimaänderungen

Es besteht kein Zweifel mehr daran, dass im 20. Jahrhundert eine mittlere globale Erwärmung der Luft von ca. 0.6°C in Oberflächennähe stattfand, die in zwei Schritten zunächst bis etwa 1940 und dann ab etwa 1975 auftrat (IPCC, 2001a, b). Weil die Amplitude zwischen einer Eiszeit (die letzte endete vor ca. 18000 Jahren) und einer Zwischeneiszeit (oft fälschlicherweise auch Warmzeit genannt) 4 bis 5°C für die mittlere globale oberflächennahe Lufttemperatur beträgt, und dafür typischerweise mindestens einige Jahrtausende vergehen, ist eine solche Erwärmung in nur einem Jahrhundert außergewöhnlich. Sie ist nachweislich im vergangenen Jahrtausend auf der nördlichen Erdhälfte nicht aufgetreten, wie aus Paläoindikatoren erschlossen werden konnte. Stark überdurchschnittliche Erwärmung wurde über großen Teilen Sibiriens, des nordwestlichen Kanadas und Alaskas beobachtet, in Übereinstimmung mit der positiven Schneeralbedo/Temperatur-Rückkopplung, die ebenfalls wesentlich ist bei dem Ausstieg aus einer Intensivphase der Eiszeit. Denn wenn eine Schneefläche mit einer Reflexionsfähigkeit (Albedo) von 60 bis 80% durch nackten Boden oder Vegetation ersetzt wird, schrumpft die Albedo auf 10 bis 20%. Bis zum über Vierfachen der angebotenen Sonnenenergie wird dann absorbiert, die die Oberfläche weiter erwärmt und benachbarte Schneeflächen schneller abschmelzen lässt.

Die Erwärmung ist in vielen Ozeangebieten unterdurchschnittlich oder fehlt ganz in Regionen mit starker vertikaler Durchmischung, so dass die Erwärmung dort auf Grund der hohen Wärmekapazität der durchmischten oberen Hunderte von Metern erst stark verzögert auftritt (man bedenke, dass die Wärmekapazität einer nur 3 m mächtigen Ozeanschicht derjenigen der gesamten Atmosphäre darüber gleichkommt).

Für viele Menschen, vor allem in subtropischen und tropischen Klimaten, sind Niederschlagsänderungen wichtiger als die der Temperatur. Deshalb wäre das Wissen über Niederschlagstrends oft viel wichtiger für die Planung in Landwirtschaft, Industrie und Tourismus. Die Routinemessung des Niederschlags ist allerdings nur genau genug für Messstationen mit kräftigem Niederschlag bei niedrigen Windgeschwindigkeiten. Der Flächenniederschlag, z.B. für ein bestimmtes Flusseinzugsgebiet, kann dennoch auch von solchen „guten“ Stationen nicht zuverlässig abgeleitet werden, da die Messnetze nicht dicht genug dafür sind. Und die Fernerkundung mit Radargeräten mit Flächendeckung ist weit davon entfernt, lange genau genug für Trendanalysen zu sein. Trotz aller dieser Ungenauigkeiten gibt es Trendschätzungen für einige Stationen, die ein grobes Bild der laufenden Änderungen ergeben: Mehr Niederschlag in höheren mittleren Breiten, besonders im Winterhalbjahr, stärkere Trockenheit in vielen semiariden subtropischen und tropischen Gebieten, und zwar ganzjährig mehr in hohen nördlichen Breiten und oft Zunahme (statistisch nicht gesichert) in den inneren Tropen (IPCC, 2001a).

Eine offensichtliche Folge der Erwärmung ist der häufige Gletscherrückgang. Auf der Basis langfristiger Massenbilanzmessungen einzelner Gletscher in vielen Gebirgen konnten Hae-

berli et al. (2001) einen mittleren Massenverlust feststellen, der zu ca. 30 cm Dickschwund pro Jahr äquivalent ist. Beispiele für die Variabilität des Gletscherschwundes sind: In den europäischen Alpen sind seit 1850 60% der Eismasse verschwunden, wohingegen einige Maritime Gletscher im westlichen Norwegen stoßen trotz der auch dort beobachteten Erwärmung vor, weil der winterliche Schneefall gleichzeitig um bis zu ca. 30% im 20. Jahrhundert zunahm, oft konzentriert in den letzten Jahrzehnten.

Der mittlere Meeresspiegel steigt als Folge dieses Gletscherschwundes aber auch der Erwärmung des Meerwassers an: Langfristmessungen an Pegeln mit ungehindertem Zugang zum offenen Ozean liefern für das 20. Jahrhundert 10 bis 20 cm Anstieg (IPCC, 2001a). Seit 1992 können dafür auch Satellitenaltimeter verwendet werden, woraus Anstieg oder Absinken für Ozeanbecken, Jahreszeiten und Erdhälften bestimmt werden kann: Die beste Schätzung für den mittleren Anstieg im vergangenen Jahrzehnt lautet: + 2 mm pro Jahr. Ob die großen Inlandeis der Antarktis und Grönlands dazu beitragen, ist noch unklar, denn die Vermessung der Geometrie dieser Eismassen, die maximal etwas 70 m Meeresspiegelanstieg bewirken könnten, ist dafür noch nicht genau genug. Klar ist jedoch, dass der Beitrag zur Meeresspiegeländerung im 20. Jahrhundert ziemlich klein gewesen sein muss.

3. Warum führt eine Klimaänderung zu neuen Wetterextremen?

Wetterextreme sind die seltenen Ereignisse in den Flügeln der Häufigkeits- oder Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Klimaparametern. Wie Abb. 1 verdeutlicht, wird eine Erhöhung des Mittelwertes von Zeit t_1 zur Zeit t_2 eine große positive Abweichung vom Mittel viel häufiger machen (mittleres schraffiertes Gebiet).

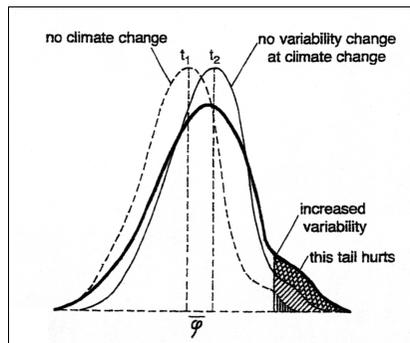


Abb. 1: Schematische Darstellung von Änderungen der Häufigkeitsverteilung meteorologischer Parameter bei Klimaänderung. Sogar wenn die Verteilung (Variabilität) sich bei Zeit t_2 nicht ändert, müssen auf der rechten Seite neue Wetterextreme auftreten (schraffierter Teil). Falls die Variabilität zunimmt, wie für den Niederschlag in vielen Gebieten beobachtet, werden seltene frühere Ereignisse weit häufiger und weit mehr neue absolute Extreme erscheinen (doppelt schraffierter Teil); aus Grassl (2001).

Ein Beispiel für die Temperatur des Sommerhalbjahres in England soll diese Aussage unterstreichen. Sollte die Temperatur bis 2050 um 1.6°C ansteigen, was in Klimamodellen bei unverändertem Verhalten der Menschheit sehr wahrscheinlich ist, und bliebe die Häufigkeitsverteilung unverändert (eine recht solide Annahme für die Temperatur), dann würde aus dem heutigen sehr seltenen Ereignis mit drei Standardabweichungen, das mit 1.3% Wahrscheinlichkeit auftritt, ein Ereignis mit nur einer Standardabweichung und träte 25 Mal so häufig auf. Verbreiterte sich die Häufigkeitsverteilung bei Verschiebung des Mittelwertes, was z.B. für die Regenmenge pro Niederschlagsereignis beobachtet wird, dann nähme die Häufigkeit extremer Ereignisse noch weiter zu (doppelt schraffierter Teil in Abb. 1). Also sollte eine Klimaänderung bisher als extrem gewertete Wetterereignisse auf einer Seite der Verteilung häufiger machen und eventuell weniger häufiger auf der Seite mit den negativen Abweichungen. Nur bei starker Schrumpfung der Breite der Verteilung könnten neue Wetterextreme vermieden werden. Dies deutet sich für keinen der wichtigen Klimaparameter an. Da unsere Infrastruktur an die „alte“ Verteilung angepasst ist, werden wir stärkere Schäden hinnehmen müssen, die vor allem bei neuen absoluten Extremen auftreten werden. Wie wir darauf reagieren sollten, wird in Abschnitt 8 beschrieben.

4. Beobachtete Veränderungen von Wetterextremen

Wetterextreme sind seltene Ereignisse. Deshalb ist der Nachweis veränderter Häufigkeit dieser Ereignisse eine sehr schwierige Aufgabe. Die erste Voraussetzung sind lange Messreihen, die es leider nur in einigen Gebieten mit ausreichender Genauigkeit gibt, und die zweite ist unveränderte Messinstrumente und Auswertemethoden oder – falls es zu Änderungen gekommen ist – eine überlappende Messperiode für neue und alte Instrumente und Methoden. Diese Bedingungen beschränken die Suche nach veränderten Häufigkeitsverteilungen auf wenige Klimaparameter, nämlich Luftdruck, Lufttemperatur, tägliche Niederschlagsmenge und Wasserstand an Flüssen in einigen Regionen, meist in Europa, Nordamerika sowie Süd- und Ostasien.

So hat eine 120-jährige Zeitreihe des Luftdrucks auf Meeresniveau an drei Küstenstationen in der Deutschen Bucht die Ableitung der Sturmhäufigkeit erlaubt. Das Ergebnis war: Windstärken über Beaufort 8 aus einer Richtung, die Sturmfluten in Weser (Bremen) und Elbe (Hamburg) verursachen, zeigen zwei breite Maxima von 1920 bis 1930 und etwa 60 Jahre später aber keinen signifikanten Trend, wohl aber keine erneute Abnahme in jüngster Zeit (v. Storch und Schmidt, 1998). Die Suche nach veränderter Häufigkeit von Überschwemmungen an Nebenflüssen von Donau und Rhein, die nicht stark von lokalen menschlichen Aktivitäten betroffen sind, förderte eine massive Zunahme extrem hoher Pegel zutage. Was früher die „Jahrhundertflut“ mit einer mittleren Wiederkehrzeit von 100 Jahren in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts genannt wurde, wurde in der zweiten Hälfte zur 20-jährigen oder gar zur 10-jährigen Flut (Caspary und Haerberli, 1999). Der Grund: Zunahme der Winterniederschläge aber nicht stark zunehmende Regenmenge pro Ereignis während der vergangenen Jahrzehnte.

Der wichtigste Befund bei der Suche nach veränderter Häufigkeitsverteilung von Klimaparametern ist jedoch folgender: In allen Regionen mit Zunahme oder Stagnation der gesamten jährlichen Niederschlagsmenge im 20. Jahrhundert und in vielen Gebieten mit leicht abnehmender Gesamtmenge hat die Niederschlagsmenge pro Ereignis zugenommen, d.h. Starkniederschläge wurden häufiger (IPCC, 2001a). Diese Beobachtung ist Folge der Clausius-Clapeyronschen Gleichung, die fordert: Steigt die Temperatur um nur ein Grad Celsius an, dann nimmt der Sättigungsdampfdruck für Wasserdampf um 6, 8 bzw. 20% bei 20°C, 0°C bzw. -80°C zu. Deshalb müssen höhere Oberflächentemperaturen zu höheren Niederschlagsraten bei sonst ungeänderten Zirkulationsbedingungen führen.

Zusammenfassend, es ist also die höhere Wahrscheinlichkeit für heftigen Niederschlag bei einem wärmeren Klima, die die stärkste Bedrohung für unsere Infrastruktur darstellt. Wir werden stärkere Siele, verstärkte und versetzte Deiche und Dämme brauchen, aber es wird vielerorts gleichzeitig längere Abschnitte ohne Regen (Dürren) geben, wenn z.B. der Gesamtniederschlag nicht entsprechend zunimmt.

5. Hochgerechnete Änderungen von Klimaparametern und zugehörige Wetterextreme

Wie vom Zwischenstaatlichen Ausschuss über Klimaänderungen (IPCC, 2001a) festgestellt, ist die Lufttemperaturzunahme an der Erdoberfläche im 20. Jahrhundert, speziell diejenige während der vergangenen 3 bis 5 Jahrzehnte mit hoher Wahrscheinlichkeit von der Menschheit verursacht. Deshalb wird jüngst den Klimamodellrechnungen zur weiteren Erwärmung im 21. Jahrhundert mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Es gibt viele verschiedene Szenarien menschlichen Verhaltens (IPCC, 2001a), die zu einer großen Spanne mittlerer globaler Erwärmung in Oberflächennähe führen, und die von den Annahmen über Wirtschaftswachstum, damit Bevölkerungsentwicklung, Globalisierungsgrad, technischem Fortschritt und Präferenzen für bestimmte Energieträger abhängen. Für keines dieser Szenarien wurde Klimapolitik angenommen, obwohl einige ein Verhalten voraussetzen, das nahe an eine solche herankommt. Es gibt auch schon Klimaschutzenszenarien, die aber meist vorgeschriebene maximale Konzentrationen des CO₂ in der Atmosphäre zu festen Zeitpunkten vorgeben, ohne die Folgen für die Wirtschaft zu beachten. Die von IPCC (2001a) angegebene Spanne von 1.4 bis 5.8°C mittlerer globaler Erwärmung im Laufe des 21. Jahrhunderts geht auf Szenarien zurück, die ohne jede Klimaschutzpolitik entweder fast nur auf Kohle und Kernenergie setzen (obere Werte) oder bei Internalisierung externer Effekte (z.B. über Ökosteuer oder CO₂-Steuer) vergleichsweise rasch den Übergang zu erneuerbaren Energien schaffen. Die Unsicherheit der Klimamodelle steckt natürlich ebenfalls noch in diesen Abschätzungen, dominant für die obige Temperaturspanne sind jedoch die Annahmen über den Energieeinsatz und die Energieträger.

Higher Risk of wet Winters in Europe due to Climate Change?

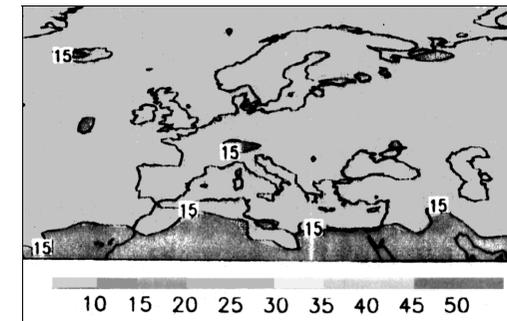


Abb. 2a: Risk of wet ($\mu + \sigma$) winter (20th CO₂)

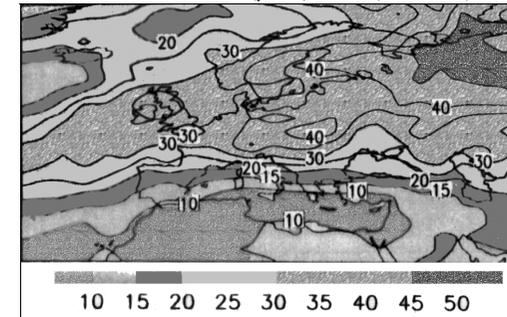


Abb. 2b: Risk of wet ($\mu + \sigma$) winter (2 x CO₂)

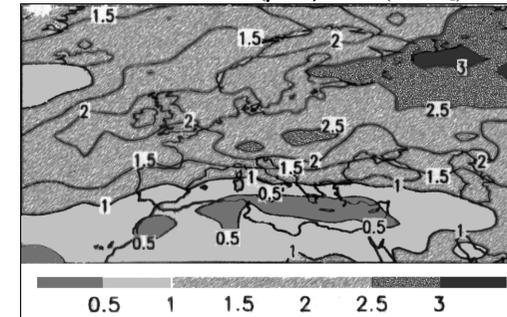


Abb. 2c: Risk (21stC)/ Risk (20thC)

Abb. 2a-c: Änderung der Wahrscheinlichkeit nasser Winter in Prozent, hier definiert als die Standardabweichung übertreffend. Oben: Wahrscheinlichkeit heute; Mitte: Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt der Verdoppelung der vorindustriellen CO₂-Konzentration in einem Rechenlauf einiger gekoppelter Atmosphäre/Ozean/Land-Modelle (61 bis 80 Jahre von heute entfernt); unten: Verhältnis beider Wahrscheinlichkeiten als Maß für das Risiko eines nassen Winters als Folge anthropogener Klimaänderung; nach Palmer und Räisänen (2001).

Es gibt nur wenige Versuche, Wetterextreme aus Klimamodellläufen abzuleiten. Der Hauptgrund für dieses Zögern ist die fehlende räumliche Auflösung bei langen Klimamodellläufen. Weil Wetterextreme regionale oder lokale Phänomene sind, werden sie in globalen gekoppelten Atmosphäre/Ozean/Land-Modellen noch nicht ausreichend genau beschrieben.

Bei zunehmender Rechnerleistung wird es bald mehr solche Versuche geben. Einer dieser Versuche von Semenov und Bengtsson (2002) sei hier erwähnt. Die Autoren zeigen, dass die beobachtete Zunahme der Regenmenge pro Ereignis weitergeht, wenn die Erwärmung an der Oberfläche weiter zunimmt. Diese Intensivierung des Wasserkreislaufs ist für das Binnenland wahrscheinlich die größte physikalische Bedrohung bei einem Klimawandel, besonders in mittleren und hohen Breiten. Für die Küstenzonen ist der gleichzeitige und beschleunigte Meeresspiegelanstieg eine zusätzliche und vielleicht meist noch größere Wirkung einer Klimaänderung. Was sind die Folgen eines intensivierten Wasserkreislaufs? Vor allem eine größere Häufigkeit von Sturzfluten aber auch von großen Winterfluten in mittleren Breiten. In einem weiteren Versuch, die physikalischen Folgen einer mittleren globalen Erwärmung durch einen erhöhten Treibhauseffekt für Europa abzuschätzen, stellten sich Palmer und Räisänen (2001) folgende Frage: Wird es mehr nasse und milde Winter geben?

Wie Abb. 2a-c verdeutlicht, werden Mittel- und Nordeuropa weit mehr nasse Winter bekommen (hier definiert als außerhalb der bisherigen Standardabweichung liegend). Für die Bürger, Behörden und Versicherer sind das schlechte Nachrichten, weil die Überschwemmungen im Winter, z.B. entlang des Rheins, der Elbe, der Oder, der Weichsel etc., häufiger werden bei zusätzlich stark reduzierter Schneedeckendauer. Die Empfehlung des Autors für Dienste und Behörden lautet deshalb: Bitte wertet existierende lange Reihen aus, um Tendenzen für veränderte Variabilität von Klimaparametern zu finden, und um daraus Extrapolationen (mögliche Zukünfte) für die kommenden Jahrzehnte abzuleiten. Anhand dieser sind die Infrastruktureränderungen (meist wohl Verstärkung) neu zu gestalten.

6. Die Klimakonvention der Vereinten Nationen und das zugehörige Kyoto-Protokoll

Als der erste bewertende Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses über Klimaänderungen erschien (IPCC, 1990) und bei der zweiten Weltklimakonferenz in Genf, Schweiz, diskutiert worden war, forderte die Ministerkonferenz im Anschluss an die wissenschaftliche Tagung Anfang November 1990 eine zeichnungsfähige Rahmenkonvention zu Klimaänderungen bis zur Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro, Brasilien, im Juni 1992. Die Rahmenkonvention der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC), welche in Rio von 154 Ländern gezeichnet wurde, ruhte auf drei wissenschaftlichen Befunden. Erstens, dem beobachteten, anthropogenen Anstieg der Konzentrationen aller langlebigen natürlicherweise in der Atmosphäre vorkommenden Treibhausgase (Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffdioxid (N₂O)); zweitens, der hohen Korrelation zwischen CO₂- und CH₄-Konzentration und der Temperatur bei der Niederschlagsbil-

dung über Inlandsgebieten seit ca. 160000 Jahren vor heute; drittens, Projektionen einer starken mittleren Erwärmung von bis zu einigen Grad Celsius im 21. Jahrhundert falls die Treibhausgasemissionen ungebremst weiter ansteigen. Zu dieser Zeit gab es noch keine gekoppelten Atmosphäre/Ozean/Land-Modelle sondern nur Zirkulationsmodelle der Atmosphäre mit einem Deckschicht-Ozean, die nur die Antwort auf eine vorgegebene CO₂-Konzentration geben konnten, die aus einfachen Projektionen der Emissionen ohne Klimaschutzpolitik mit sehr einfachen Kohlenstoffkreislaufmodellen erschlossen worden waren.

Bei der ersten Vertragsstaatenkonferenz der UNFCCC Ende März/Anfang April 1995 in Berlin baten die Signatarstaaten um ein legales Instrument oder ein Protokoll zur Konvention, das zur dritten Vertragsstaatenkonferenz (VSK3) fertig sein sollte, weil auch den Politikern klar geworden war, dass die Stabilisierung der Emissionen in Industrieländern auf dem Niveau von 1990 im Jahre 2000 weit von einer wirksamen Klimaschutzmaßnahme entfernt ist. Das Kyoto-Protokoll, bei VSK3 in Kyoto, Japan, am 10. Dezember 1997 von allen anwesenden Ländern (>150) angenommen, fordert eine Verringerung der Treibhausgasemissionen der Industrieländer um im Mittel 5,2%. Falls mindestens 55 Länder, die 55% der Emissionen der Industrieländer im Jahre 1990 umfassen müssen, ratifiziert haben, würde zum ersten Mal eine Trendumkehr für Industrieländer eingeleitet. Warum ist das Kyoto-Protokoll überhaupt akzeptiert worden? Weil die wissenschaftliche Basis eine vierte Säule hinzu bekam. Im Zweiten Bewertenden Bericht des IPCC (1996) hieß es: „*The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate*“. Das anthropogene Klimasignal war in Beobachtungen entdeckt worden, trotz der Verzögerung des vollen Signals um Jahrzehnte durch die hohe Wärmekapazität des Ozeans.

Der Ratifizierungsprozess wurde jedoch eine fast endlose Geschichte, weil einige Industrieländer realisieren mussten, dass Emissionsreduktionen kräftiges Entscheiden heißt und Interessengruppen wie die Ölindustrie wissenschaftliche Unsicherheiten wie Reduktionskosten aufblähten. Deshalb bekamen die flexiblen Kyoto-Mechanismen wie Emissionshandel, Anrechnung von Senken für Treibhausgase, gemeinsame Umsetzung in Industrienationen und zwischen Industrie- und Entwicklungsländern das notwendige „Kleingedruckte“ erst bei VSK7 in Marrakesch im November 2001. Vieles ist dabei von Konferenz zu Konferenz weiter verwässert worden. Andererseits enthält das Kyoto-Protokoll aber Sanktionen, z.B. muss, wenn Verpflichtungen für die erste Überwachungsperiode, gemessen als Mittelwert von 2008 bis 2012, im Vergleich zu 1990 nicht erreicht wurden, ein Faktor 1,3 in der zweiten Periode erbracht werden. Da die Regierung der USA im Jahre 2001 aus dem Kyoto-Protokoll ausstieg, braucht das Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls nun auf jeden Fall die Ratifizierung durch die Russische Föderation, die es im September 2002 beim Weltgipfel für Nachhaltige Entwicklung in Johannesburg, Südafrika, ankündigte.

Wie ist das „Kleingedruckte“ für alle Kyoto-Mechanismen geschafft worden? Wieder durch einen Bericht des IPCC. Der Dritte Bewertende Bericht (IPCC, 2001a) wies die rasche mittlere Erwärmung der jüngsten Jahrzehnte überwiegend menschlichen Aktivitäten zu.

Verschärfungen des Kyoto-Protokolls werden sicherlich das Risiko neuer Wetterextreme vermindern, jedoch erst auf lange Sicht. Deshalb werden sie in den kommenden Jahrzehnten noch nicht zu verminderter Anpassungsleistung an die laufenden Klimaänderungen führen. Wir leben in einem Zeitabschnitt, in dem wir für bisher fehlende Maßnahmen zur Verlangsamung der Veränderung der langfristigen Zusammensetzung der Atmosphäre zahlen müssen.

7. Transformation des globalen Energiesystems

Der Hauptbeitrag zur Treibhausgaszunahme in der Atmosphäre stammt vom mit fossilen Brennstoffen dominierten Energieversorgungssystem in entwickelten sowie vielen Entwicklungsländern. Weit mehr als die Hälfte des zusätzlichen Treibhauseffektes wird davon in Form des sogenannten CO₂-Äquivalents (CH₄ und N₂O sind entsprechend ihrer Strahlungswirksamkeit einbezogen) beigetragen. Deshalb wird die Umsetzung der Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls in den Industrieländern wesentlich eine Dekarbonisierung des Energiesystems sein, getragen sowohl von Effizienzsteigerungen wie Technologieänderungen. Die einfachste aller Optionen ist ein Brennstoffwechsel von Braun- und Steinkohle zu Erdgas im Kraftwerk- und Heizungsbereich, wobei bis zum Faktor 2 weniger CO₂ emittiert wird. Die Option „Kernenergie“, welche nahezu CO₂-frei ist, wird von Entwicklungsländern und einigen Industrieländern nicht als solche gesehen, hauptsächlich wegen der Risiken Proliferation an undemokratische Länder und Kriminelle sowie wegen der möglichen Terrorangriffe gegen Kernkraftwerke. Die generelle Option „starke Energieeffizienzsteigerung“ ist eine besonders günstige und sehr oft ökonomische, aber sie befreit nicht von der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, sie bereitet aber vor auf die zentrale Option: Die langfristige Fortentwicklung der „neuen“ erneuerbaren Energieträger, nämlich passive Solarheizung, Sonnenenergie für Wärme, Photovoltaik für elektrischen Strom, solarthermische Kraftwerke, Windenergieanlagen, Biogaskraftwerke, Geothermie für Wärme und Strom, etc.

Die mittlere Energieflussdichte von der Sonne beträgt an der Erdoberfläche etwa 170 Wm⁻². Das Angebot auf Kontinenten und Küstenzonen ist damit mehr als 3000-fach höher als der gesamte Energiedurchsatz der menschlichen Gesellschaft. Würden wir die direkte Sonne als Energiequelle wählen, wären wir keine Störenfriede mehr. Das Hauptproblem bei der Transformation der Energiesysteme in eine zweite solare Ära ist die größtenteils fehlende Internalisierung der externen Kosten, die bisher zur Reparatur der Gesundheits- und Umweltprobleme der Allgemeinheit und nicht dem Verursacher angelastet werden. Ein „glänzendes“ Beispiel für diese falsche Praxis sind die Subventionen für fossile Energieträger in den meisten Ländern oder fehlende Steuern auf fossile Brennstoffe. Daher müssen die so benachteiligten neuen Erneuerbaren durch ökonomische Anreize aus ihrem Promille-Ghetto herausgeholt werden. In diesem Zusammenhang ist es nicht weitsichtig, nur diejenigen erneuerbaren Energieträger mit Markteinführungsanreizen zu fördern, die knapp vor der Rentabilität sind, es müssen auch diejenigen, wie die Photovoltaik, die noch weit davon entfernt sind, zusätzlich durch

intensivierte Forschungsanstrengungen gefördert werden. Sie werden in Jahrzehnten, mit dann geringer Störung natürlicher Prozesse, das Rückgrat der Energieversorgung sein. Zum Beispiel ist es ungünstig, massiv in die Nutzung der Biomasse als Energieträger zu investieren, da dann Flächenkonkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion entstünde. Die Nutzung der direkten Sonnenenergie ist die Option auf lange Sicht, weil sie das Klimasystem bei weit unter einem Promille Anteil nicht stört.

8. Lokale Anpassung und globale Abwehr eines raschen Klimawandels

Die verzögerte Reaktion des Klimasystems auf Anstöße, der späte Beginn von Klimaschutzmaßnahmen (Klimaschutz hier definiert als Dämpfung der anthropogenen Klimaänderungsrate), die Anpassung an laufende und sich beschleunigende Klimaänderungen, und die Unfähigkeit den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen innerhalb der nächsten Jahrzehnte zu stoppen, stellen eine große Herausforderung für die gesamte Menschheit dar. Wir müssen gleichzeitig global den Anstoß zu Klimaänderungen dämpfen und uns lokal anpassen, aber wir können die Effekte globaler Maßnahmen erst nach Jahrzehnten beobachten. Mehr unseres Bruttosozialprodukts muss für die Anpassung an Klimaänderungen ausgegeben werden (meist um uns vor Wetterextremen zu schützen). Ein ethisches Problem wird uns dabei helfen: Die besonders durch Klimaänderungen Verwundbaren haben sie meist nicht wesentlich mitverursacht. Deshalb müssen wir die Finanzmittel für die Anpassung der Entwicklungsländer an Klimaänderungen finden, wie es bereits in Anpassungsfonds im Kyoto-Protokoll vorgesehen ist. Eine zentrale Quelle dieser Finanzen könnten die Entgelte bei der Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter wie Luftraum und hohe See werden, wie jüngst vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen vorgeschlagen (WBGU, 2002, 2003).

9. Literatur

Caspary, H.J., W. Haeberli (1999): Klimaänderungen und die steigende Hochwassergefahr. In: Wetterwende: Vision Globaler Klimaschutz, H. Graßl (Hrsg.), Campus-Verlag, Frankfurt/Main, Bd. 3 der EXPO 2000 Buchreihe; ISBN 3-593-36035-7.

Graßl, H. (2000): Status and improvements of coupled general circulation models – review. *Science*, 288, 1991-1997.

Haeberli, W., M. Hoelzle, M. Maisch (2001): Glaciers as key indicators of global climate change. In: *Climate of the 21st Century: Changes and Risks*, J. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer (Hrsg.), Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, Germany ISBN 3-00-002925-7.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1990): *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Eds.: J.T. Houghton, G.J. Jenkins, J.S. Emphraums, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996): *Climate Change 1995 – The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds.: J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001a): *Climate Change: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report (TAR)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001b): Policy-makers summary.

Palmer, T.N., J. Räisänen (2001): Quantifying risk in a changing climate. *CLIVAR Newsletter*, Vol. 6, No. 3, 3-4; International CLIVAR Project Office, Southampton Oceanography Centre, Southampton, UK.

Schmidt, H., H. von Storch (1993): German bight storms analyzed. *Nature*, 365, 791.

Semenov, V.A., L. Bengtsson (2002): Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, 19, 123-140.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2002): Entgelte für die Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter. ISBN 3-9807589-8-2.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2003): *Welt im Wandel - Energiewende zur Nachhaltigkeit*. ISBN 3-540 401 601.