



Klimawandel und Global Warming: Ursachen, Ausprägung und wahrscheinliche Entwicklung des weltweit größten Umweltproblems

Urheber: Patrick Zopf

Einleitung

1. Das Klima und seine Bedeutung

2. Ursachen und zeitliche Entwicklung anthropogener Klimaänderungen

2.1 Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt

2.2 Die Änderung der chemischen Zusammensetzung der Troposphäre und ihre Ursachen

2.3 Die Zeitverzögerung: Eine neue Dimension der globalen Klimaproblematik

3. Ausprägung anthropogener Klimaänderungen und ihre Auswirkungen auf die Erde

4. Wahrscheinliche Entwicklung des Klimas

4.1 Modellprognosen und ihre Grenzen

4.2 Konsens in der Klimaforschung (IPCC- Schätzung)

Schlussbetrachtung

Einleitung

In der Politikwissenschaft unterliegt die noch junge Teildisziplin „Internationale Beziehungen“ heute im doppelten Sinne einem Strukturwandel. Zum einen erscheint es nahezu unmöglich, den Gegenstand des Faches näher zu skizzieren, so „...dass [...] das konstitutive Grunddatum dieses Gegenstandes, das „Internationale“, in komplexen globalen Zusammenhängen kaum noch als ein spezifischer Wirklichkeitsbereich bestimmbar ist.“¹ Zum anderen hat das Fach „Internationale Beziehungen“ gerade bedingt aus der Not hinreichender Schärfe des Gegenstandes die Tugend gemacht, sich in thematischer Vielfalt zu präsentieren, indem Anknüpfungspunkte zu Ansätzen anderer Disziplinen aufgegriffen werden.² Eine Entgrenzung des Faches zeigt sich für den Politikwissenschaftler Prof. Mathias Albert generell also weniger quantitativ an der Vielzahl von IB- Theorien, sondern vielmehr an der Entwicklung, die die Theorielandschaft der letzten fünfzehn Jahre prägen. Hiermit ist die eben angedeutete Verdichtung interdisziplinärer Züge des Faches gemeint. Die „Internationalen Beziehungen“ machen vermehrt Anleihen bei anderen Disziplinen, als Beispiel seien insbesondere hierfür die Philosophie, die Soziologie, die Ökonomie und die Rechtswissenschaft zu nennen.³

Der Zwischenstaatliche Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC), der 1988 gemeinsam von der Welt-Meteorologie Organisation (WMO) und dem Umwelt-Programm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet wurde, die Weltklimakonferenz in Genf 1990 und die UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro mit über 25.000 Teilnehmern haben Naturwissenschaftler und Verantwortliche aus der Politik zusammengeführt, um sich dem Problem des Klimawandels und der globalen Erwärmung zu widmen. „Obwohl die Komplexität des Phänomens globale Erwärmung noch immer keine letztverbindliche [sic] naturwissenschaftliche Analyse und Erklärung zulässt, wird in der seriösen Wissenschaft heute kaum mehr bestritten, dass es tatsächlich eine weltweite Klimaänderung gibt, die anthropogenem Ursprungs ist.“⁴ Von den darauf folgenden jährlichen Konferenzen ist für die

¹ Albert, Entgrenzung und internationale Beziehungen, 2003, S. 555.

² Vgl. ebd., S. 555.

³ Vgl. ebd., S. 568.

⁴ Rotte, Global Warming, 2001, S. 6.

Klimapolitik daher das 1997 verfasste „Kyoto-Protokoll“ von zentraler Bedeutung, welches bescheidene, aber dennoch konkrete Ziel- und Zeitvorgaben und erste Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen enthält. Diese Klimakonvention erfüllt die Kriterien eines internationalen Regimes. Es wird versucht ein gemeinsames grenzüberschreitendes Problem zu lösen. Dafür handeln die Staaten ein Set von Verhaltenserwartungen aus. Diese Tatsache verdeutlicht, dass sich nicht nur die politischen Entscheidungsträger, sondern auch die Politikwissenschaft selbst im Rahmen des erweiterten Sicherheitsbegriffs mit den Expertisen aus den einschlägigen Naturwissenschaften auseinandersetzen hat.

Erst in den letzten Jahren haben sich überhaupt Politikwissenschaftler und auch politische Ökonomen seriös mit dem Klimawandel in sicherheitspolitischer Hinsicht beschäftigt. Dabei ist das Klimaproblem bereits heute Ursache gewaltsamer Konflikte und sozioökonomischer Krisen im Allgemeinen, und somit sehr wohl eine zentrale Frage der Sicherheitspolitik.⁵ Als Beispiel sei hierfür die zunehmende Wasserknappheit in einigen Teilen Afrikas zu nennen, die aus den häufiger und intensiver einsetzenden Dürreperioden resultiert. Eine Verschlechterung der Lebensbedingungen in diesen Regionen hat zu einem steigenden Migrationsdruck auf die ohnehin instabilen Nachbarregionen geführt, die den Ansturm weder politisch noch logistisch bewältigen konnten. So entfachten Bürgerkriege und Verteilungskämpfe um den Zugang zu den knapp gewordenen Ressourcen.

Betrachtet man die Klimaszenarien des IPCC, die einen Art Konsens in der Klimaforschung repräsentieren, so zeigt sich eine klare Verschärfung der Situation, die sich vor allem vor dem Hintergrund der Trägheit des Klimas einerseits sowie einer ständig wachsenden Weltbevölkerung andererseits allerhöchstens auf ein tolerierbares Maß abmildern lässt. Gegenstand dieses Beitrags ist aber weder die Frage nach den aus dem Klimawandel resultierenden sozioökonomischen oder sicherheitspolitischen Folgen noch die Frage, wie die Politik ihren Kompass auf das veränderte Klima auszurichten hat. Allenfalls in der Schlussbetrachtung werden Maßnahmen zum Klimaschutz präsentiert. Vielmehr soll hingegen der naturwissenschaftliche Hintergrund zu diesem Problemkomplex beleuchtet werden. Dabei geht es darum, das Wissen über Klimaänderung und globale Erwärmung, ihre Ursachen, ihre derzeitige Ausprägung und die wahrscheinliche Entwicklung des Klimas in einer verständlichen Weise darzustellen. Letztlich kann die Klimadiskussion aber nicht aus ihrer Wissenschaft exportiert werden, deshalb beschränkt sich die Untersuchung auch, wie bereits angedeutet, nahezu ausschließlich auf den wichtigen Faktor der menschlich induzierten Klimaänderung. „...Andere Einflussfaktoren, die den Zustand des globalen Klimasystems auf allen Raum- und Zeitskalen determinieren und in ihrer Wirkungsweise und Tragweite teilweise noch unverstanden sind...“⁶ können hier nicht diskutiert werden. Es obliegt den Klimaforschern solche natürlichen Prozesse zu bewerten und von einer potentiellen anthropogenen Attribution zu differenzieren.

1. Das Klima und seine Bedeutung

Während das Wetter den aktuellen Zustand der Atmosphäre beschreibt, bezeichnet der Begriff „Klima“ den Durchschnittswert des Wettergeschehens gemittelt über lange Zeiträume und große Gebiete.⁷ Der klassische von der WMO definierte Bezugszeitraum beträgt drei Jahrzehnte. Im weiteren Sinne kennzeichnet der Begriff „Klima“ den Zustand des Klimasystems, welches sich aus den fünf Hauptbestandteilen Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, der Landoberfläche und der Biosphäre zusammensetzt. Das Klimasystem verändert sich über die Zeit unter dem Einfluss seiner Eigendynamik und durch externe Kräfte wie Vulkanausbrüche, solare Schwankungen und vor allem seit den letzten fünfzig Jahren durch menschliche Aktivitäten, die eine Änderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre verursachen.⁸

So wie eine Schwalbe noch keinen Sommer bedeutet, weist ein außergewöhnliches Klimajahr noch lange nicht auf einen Klimawandel hin. Das Klima ist zu sprunghaft, und wir

⁵ Vgl. Rotte, Global Warming, 2001, S. 7.

⁶ Paeth, Anthropogene Klimaänderungen, 2000, S. 4.

⁷ Vgl. Latif, Hitzerekorde und Jahrhundertflut, 2003, S. 41.

⁸ Vgl. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 126-127.

benötigen längere Messreihen, die deutlich weiter zurückreichen, um die gegenwärtige Klimasituation besser bewerten zu können.⁹ Anders gesagt: beim Klima handelt es sich um ein stark nicht-lineares System. Lineare Systeme sind sehr einfach: Sie reagieren umso stärker, je stärker der Reiz ist, der auf sie ausgeübt wird. Der Zusammenhang zwischen Reiz und Reaktion ist eine Gerade, er ist eben „linear“. Komplexe Systeme sind überwiegend stark nicht-linear. Kennzeichnend ist eine Neigung zur Selbstregulierung und zum plötzlichen Übergang in einen qualitativ anderen Zustand, sobald ein kritischer Punkt überschritten wird.¹⁰

Erst seit 1992 haben die Klimaforscher basierend auf den Untersuchungen von Eisbohrkernen aus Grönland und der Antarktis einen Einblick in die Klimageschichte der vergangenen hunderttausend Jahre. Das Ergebnis des Analyseverfahrens liefert die interessante Information, dass im Verlauf der Erdgeschichte immer wieder abrupte Klimawechsel stattgefunden haben. Erst seit den letzten 10.000 Jahren ist das Klima relativ stabil. Nur durch die derzeitige Warmzeit, dem Holozän, konnten große Teile der Menschheit überhaupt sesshaft werden, es bildete sich eine Zivilisation heraus.

2. Ursachen und zeitliche Entwicklung anthropogener Klimaänderungen

2.1 Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt

Es ist die Atmosphäre, die das Leben auf der Erde in seiner bestehenden Form ermöglicht. Ohne schützende Gashölle läge die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche bei arktischen

-18°C, tatsächlich liegt sie derzeit bei +15,5°C. Verantwortlich für den Temperaturunterschied von +33°C sind klimarelevante Spurengase in der Atmosphäre. Diese werden Treibhausgase genannt, und haben die folgende wichtige physikalische Eigenschaft: Sie lassen die kurzwellige Sonnenstrahlung nahezu ungehindert passieren, während sie stattdessen die lang-wellige Wärmestrahlung von der Erdoberfläche am Abstrahlen ins Weltall stark hindern. Erdoberfläche und Atmosphäre erwärmen sich. Dieser Prozess wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet.¹¹

Steigt die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre durch anthropogene, also von Menschenhand verursachte Emission, etwa von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), troposphärischem Ozon (O₃) oder Distickstoffoxid (N₂O), so kommt es zu einer zusätzlichen Erwärmung von Erdoberfläche und Atmosphäre. Hinzu kommen Fluorchlorkohlenstoffe (FCKW), die rein synthetischer Natur sind. Die FCKWs sind mit einem Beitrag von 22% zu diesem zusätzlichen Effekt, dem sogenannten anthropogenen Treibhauseffekt, nicht nur extrem klimarelevant, sondern sie sind auch für die Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht verantwortlich.¹²

2.2 Die Änderung der chemischen Zusammensetzung der Troposphäre und ihre Ursachen

Die in Abschnitt 1) angeführten Analysen von Eisbohrkernen haben auch noch weitere Erkenntnisse geliefert. So verraten winzige im Eis eingeschlossene Luftbläschen die Zusammensetzung der Atmosphäre der letzten hunderttausend Jahre. Diese hat sich im Zuge der industriellen und landwirtschaftlichen Entwicklung ganz erheblich verändert. So sind in diesem Zeitraum die Konzentrationen aller klimarelevanten Spurengase deutlich angestiegen. „Der beobachtete Konzentrationsanstieg dieser Substanzen ist auf eine Vielzahl anthropogener Aktivitäten zurückzuführen, mit denen der Mensch in die biochemischen Kreisläufe der klimarelevanten Spurenstoffe eingreift.“¹³ An erster Stelle ist in diesem Zusammenhang die Verbrennung fossiler Energieträger zu nennen, durch die jedes Jahr

⁹ Vgl. Latif, , Hitzerekorde und Jahrhundertflut, 2003, S. 18-19.

¹⁰ Vgl. Rahmstorf, Treibhauseffekt und Klimawandel, 2001, S. 6.

¹¹ Vgl. Johann, Die Auswirkungen des Klimawandels auf Österreich, 1993, S. 3.

¹² Vgl. ebd., S 3.

¹³ Seiler, Ursachen anthropogener Klimaänderungen, 1992, S. 10.

rund 6 Gigatonnen Kohlenstoff (C) in die Atmosphäre emittiert werden. Hinzu kommen rund 1,5 Gigatonnen CO₂, die aufgrund von Landnutzungsänderungen und Waldrodungen freigesetzt werden.¹⁴ Durch die Abholzung der Wälder geht außerdem ein riesiger natürlicher CO₂-Speicher verloren.

„Die Zunahme der CH₄- und N₂O-Konzentrationen in der Atmosphäre ist im wesentlichen auf landwirtschaftliche Aktivitäten, so u.a. auf die Ausweitung des Nassreisbaus, auf die vermehrte Viehhaltung sowie auf den verstärkten Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern zurückzuführen.“¹⁵ Der Anstieg des troposphärischen Ozons ist auf die vermehrte Emission organischer Verbindungen, des Kohlenmonoxids (CO) und der Stickoxide (NO) zurückzuführen. Solche Substanzen werden vor allem durch die Kraftstoffverbrennung in Automobilen erzeugt und in der Atmosphäre durch photochemische Reaktionen unter Bildung von Ozon abgebaut.

Obwohl die Auswirkungen des Flugverkehrs auf das Klima noch heftig diskutiert werden, gehen die Klimaforscher davon aus, dass der von den Flugzeugen in großer Höhe ausgestrahlte Wasserdampf über die Bildung von Zirruswolken den anthropogenen Treibhauseffekt verstärkt.¹⁶

Tabelle 1: Beobachtete Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Troposphäre zwischen 1860 und 2001

Spurengas	Dimension	1860	heute
Kohlendioxid [CO ₂]	ppmv	275	370
Methan [CH ₄]	ppmv	0,7	1,8
Distickstoffoxid [N ₂ O]	ppbv	280	316
FCKW-F11 [CFCl ₃]	pptv	0	250
FCKW-F12 [CF ₂ Cl ₂]	pptv	0	400
Ozon in Troposphäre [O₃]	ppbv	15	45

Quelle: Seiler, Ursachen anthropogener Klimaänderungen, 1992 & IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002..

2.3 Die Zeitverzögerung: Eine neue Dimension der globalen Klimaproblematik

Innerhalb des Klimasystems spielen, wie bei anderen komplexen Systemen auch, die Begriffe

„Zeitspanne“ und „Trägheit“ zur Beschreibung von Reaktionen aufgrund externer Beeinträchtigungen eine wichtige Rolle. Eine Zeitspanne ist die Zeit, die eine Störung in einem Prozess benötigt, um wenigstens die Hälfte ihres Effekts zu zeigen. Trägheit hingegen bedeutet Verzögerung, Langsamkeit oder Widerstand in der Reaktion von Systemen auf Faktoren, die ihre Änderungsrate ändern, einschließlich der Fortsetzung einer Systemänderung nach Beseitigung ihrer Ursache.¹⁷

Es lässt sich beobachten, dass einige Auswirkungen der anthropogenen Klimaänderung nur langsam in Erscheinung treten. Tatsächlich hinkt der in Atmosphäre beobachtete Konzentrationsanstieg der klimarelevanten Spurenstoffe hinter der Zunahme der Emissionsraten der

entsprechend etwa 24 Gt CO₂ und rund 3,9 t CO₂ pro Kopf der Weltbevölkerung.

¹⁴ Vgl. Houghton, Globale Erwärmung, 1997, S. 27.

Obwohl die atmosphärische CH₄-Konzentration sehr viel geringer ist als die des CO₂ (siehe Tab.1), ist der Beitrag des Methans zum Treibhauseffekt alles andere als unbedeutend. Ein Molekül Methan verursacht nämlich eine 7,5fach stärkere Treibhauswirkung als ein Molekül CO₂. Die erhöhte N₂O-Konzentration spielt mit einem Beitrag von etwa 6% zum anthropogenen Treibhauseffekt eine eher untergeordnete Rolle.

¹⁵ Seiler, Ursachen anthropogener Klimaänderungen, 1992, S. 10.

¹⁶ Vgl. ebd., S. 10.

¹⁷ Vgl. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 58.

be-treffenden Spurenstoffe hinterher. Auch wenn es möglich wäre, die Emissionsraten der klima-relevanten Spurengase auf dem derzeitigen Niveau einzufrieren, würden die Konzentrationen dieser Spurengase trotzdem weiter ansteigen. Erst nach einem relativ langen Zeitraum könnte sich ein neuer Gleichgewichtswert einstellen. Die zeitliche Verzögerung oder Einstellzeit ist von der Verweildauer der einzelnen Spurenstoffe in der Troposphäre abhängig. Im Falle des CO₂ würde ein Gleichgewichtswert erst in 100 Jahren erreicht werden; noch längere Einstellzeiten gelten für die FCKWs, deren Produktion und Verwendung seit Bestehen des Montreal-Protokolls fortlaufend erheblich eingeschränkt wurde.¹⁸

Eine weitere Zeitverzögerung wird durch die Ozeane verursacht. Ihre thermische Trägheit schiebt die Erwärmung der Erdoberfläche gegenüber der Konzentrationszunahme der klima-relevanten Spurengase um mehrere Jahre bis Jahrzehnte hinaus. Die heute beobachtete Klima-änderung geht also auf die Konzentrationsverhältnisse zurück, die vor etwa 30 bis 50 Jahren existierten. Da die atmosphärischen Konzentrationen der klimarelevanten Spurengase exponentiell ansteigen und rund die Hälfte der seit dem Industriezeitalter beobachteten Konzentrationszunahme in den letzten 30 bis 40 Jahren stattgefunden hat, ist ergo auch heute erst die Hälfte des bereits induzierten Treibhauseffekts wirksam geworden. Eine weitere Klimaänderung, die mit einem Anstieg des globalen Temperaturniveaus einhergeht, ist daher zumindest für die folgenden 30 bis 50 Jahre nicht mehr aufzuhalten.¹⁹

3. Ausprägung anthropogener Klimaänderungen und ihre Auswirkungen auf die Erde

Das Klimasystem unserer Erde hat sich seit der vorindustriellen Zeit sowohl auf globaler als auch auf regionaler Ebene nachweislich verändert. Die Tatsache, dass einige dieser Änderungen auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind, wird von wissenschaftlicher Seite klar und deutlich hervorgehoben. Dies gilt insbesondere für die beobachtete Erwärmung während des 20. Jahrhunderts. Seit 1861, dem Beginn systematischer meteorologischer Aufzeichnungen, stieg die mittlere globale Erdoberflächentemperatur um 0,6°C an. Darüber hinaus waren die 1990er Jahre weltweit die wärmste Dekade und 1998 das wärmste Jahr seit der instrumentellen Aufzeichnung.²⁰

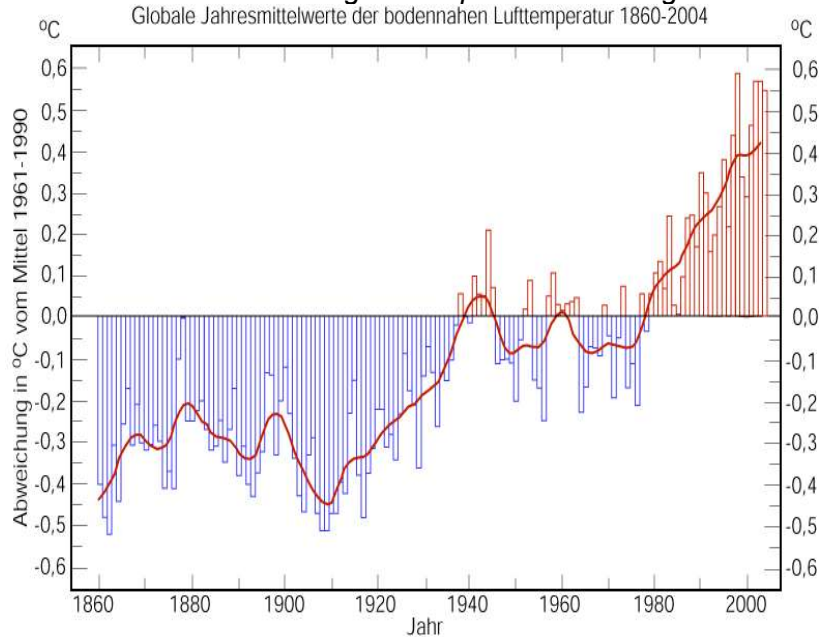
¹⁸ Vgl. Seiler, Ursachen anthropogener Klimaänderungen, 1992, S. 10-11.

¹⁹ Vgl. ebd., S.11-12.

Bei einem Konfidenzbereich von 0.4 bis 0.8°C.

²⁰ Vgl. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 18.

Abbildung 1: Temperaturerhöhung im 20. Jahrhundert



Quelle: HBS / www.hamburger-bildungsserver.de/klima

In vielen Regionen mittlerer und höherer Breiten haben sich die frostfreien Jahreszeiten verlängert. Die Schneebedeckung der nördlichen Hemisphäre hat seit 1960 um etwa 10% abgenommen und die Dauer der Eisbedeckung von Seen und Flüssen in diesen Breiten verringerte sich um zwei Wochen. Des Weiteren wird ein weltweiter Rückzug von Gebirgsgletschern in Nicht-Polargebieten beobachtet.²¹ Allein die Gletscher der Alpen verloren in den letzten 100 Jahren die Hälfte ihres Eisvolumens und 30 -40% ihrer ursprünglichen Oberflächen.

Das Abschmelzen von Polareis und die wärmebedingte Ausdehnung der Ozeane wiederum haben den Meeresspiegel in den vergangenen 100 Jahren um 20 bis 30cm ansteigen lassen.²²

Während der Niederschlag über den mittleren und höheren Breiten der Nordhemisphäre im 20. Jahrhundert um 0,5 bis 1% pro Dekade zugenommen hat, nahm er in den subtropischen Breiten dagegen im Mittel um 5% ab. Dies führte vor allem in den letzten Jahrzehnten dazu, dass in einigen Teilen Afrikas und Asiens häufigere und intensivere Dürren auftraten.²³ Auffallend war das Ausbleiben des Monsunregens in der Sahelzone während den 70iger Jahren, was zu einer jahrelangen Trockenheit in dieser Region führte. Zunächst wurden dafür Überweidung und falsches Landmanagement verantwortlich gemacht. Heute glauben die Wissenschaftler besser zu verstehen, warum der Monsun jahrelang ausblieb: Üblicherweise erwärmt die Sonne in den Sommermonaten die Ozeane nördlich des Äquators; dadurch wird ein Gürtel aus Regenwolken nordwärts gezogen, der der Sahelzone den lebensnotwendigen Niederschlag in Form des Monsunregens liefert. Die Luftverschmutzung durch die Industrieländer hat jedoch dazu geführt, dass vermehrt Aerosolpartikel in die Atmosphäre gelangten. Die zusätzliche Freisetzung solcher Schwebeteilchen infolge menschlicher Aktivitäten beeinflusste den Strahlungshaushalt der Erde, da durch deren Reflexionswirkung vermehrt Sonnenstrahlung absorbiert und zurück ins All gestreut wurde. Die Aerosolver Verschmutzung hinderte also die Sonne daran, den Atlantik ausreichend zu erwärmen. Der Wolkengürtel konnte dadurch nicht nordwärts ziehen und der Regen erreichte nicht mehr die Sahelzone.

²¹ Vgl. ebd., S.20.

²² Vgl. ebd., S.20.

²³ Vgl. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 20.

Die Effekte, die durch Aerosole aus anthropogenen Quellen verursacht werden, können dem-nach einen gewissen Einfluss auf das Klima ausüben. In der globalen Skala dämpfen die

Aerosolpartikel scheinbar den Treibhauseffekt. In welcher Größenordnung dies geschieht ist bis heute noch ungeklärt. Unbestritten ist jedoch, dass ihr Einfluss in lokalen oder regionalen Maßstäben wirksam ist.²⁴

Im pazifischen Raum ist seit 1970 eine Zunahme der El Niño- Ereignisse zu verzeichnen, de-ren Ausprägung zudem anhaltender und intensiver geworden ist. Obwohl eine positive Kor-relation zwischen einer wärmer werdenden Welt und einer höheren Häufigkeit des El Niño- Phänomens aus den mathematischen Modellanalysen noch nicht klar zu ersehen ist, gilt eine

Veränderung dieser Klima-anomalie im Zuge der durch den anthropogenen Treibhauseffekt hervorgerufenen Erwärmung als sehr wahrscheinlich.²⁵

4. Wahrscheinliche Entwicklung des Klimas

4.1 Modellprognosen und ihre Grenzen

Um Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas treffen zu können, gilt es, all die Faktoren zu berücksichtigen, die das Klima bestimmen. Klimaprognosen werden deshalb mit Hilfe von mathematischen Modellen erstellt. In ein Gleichungssystem werden wichtige Fak-toren wie Temperatur, Zusammensetzung der Atmosphäre, Einfluss der Ozeane etc. „hinein-gegeben“. Die Berechnung der Entwicklung des Klimas mittels solcher Modelle liefert aber meist nur ein grobes Abbild der Realität, da immer wieder neue Faktoren auftreten, die in die Modelle integriert werden müssten. Die Folge ist ein Trend in Richtung immer komplexerer Modelle, die auf physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften sowie auf deren Wechselwirkungen untereinander basieren:

Die Folgen der Treibhausgas-Anreicherung auf den Strahlungshaushalt und das globale Klima werden in aufwendigen Zirkulationsmodellen (GCMs) simuliert, die die dreidimensionale Struktur der Atmosphäre nachbilden. „Ziel solcher Klimasimulationen ist es, Klimaszenarien zu schaffen, um abzuschätzen, welche weiteren anthropogenen Treibhausgaseinträge zu wel-chen Klimaänderungen führen würden.“²⁶ Da Szenarien auf einem konsistenten Set von An-nahmen beruhen, stellen sie keine belastbare Prognose dar, sondern können nur als verein-fachte Beschreibung einer möglichen Zukunft gewertet werden. Schließlich geht ja bereits die Unsicherheit der zukünftigen anthropogenen Treibhausgasemissionen in die Klimasimulation mit ein, die von Unwägbarkeiten wie der exakten Zunahme der Weltbevölkerung, dem Wachstum der Weltwirtschaft und den Maßnahmen zur Verminderung der Emissionen ab-hängen.²⁷ Um den Bereich der Unsicherheiten in Bezug auf Einflussfaktoren und Emissionen abzudecken, haben die Expertenteams des IPCC ein SRES- Szenarienset entwickelt. Es be-steht aus sechs verschiedenen Szenariengruppen, die eine Variation von einer den demogra-phischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und den technologischen Wandel betreffenden Modellgeschichte reflektieren.²⁸

4.2 Konsens in der Klimaforschung (IPCC- Schätzung)

Die wissenschaftlich fundierten Modellprojektionen und Ergebnisse des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen sind soweit abgesichert, dass sie in der Klimaforschung als Consensus zu betrachten sind. Die Modellprojektionen berücksichtigen vergangene wie auch zukünftige Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen. Deshalb beinhalten sie

²⁴ Vgl. Houghton, Globale Erwärmung, 1997, S. 42.

²⁵ Vgl. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 21.

· In neueren Modellen werden Faktoren wie z.B. die Dynamik von Eisflächen in den Polarregionen, natürliche Aerosole oder Wolkenbildung hinzugefügt.

²⁶ Quenzel, Ausprägung anthropogener Klimaänderungen, 1992, S. 27.

²⁷ Vgl. ebd., S.27.

²⁸ Vgl. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 129.

Schätzungen der Erwärmungen bis heute und der unausweichlichen, zukünftigen Erwärmung bedingt durch Emissionen in der Vergangenheit. Für die Periode von 1990 bis 2100 wird ein Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur um 1,4 bis 5,8°C projiziert. Diese Ergebnisse gelten für die gesamte Spannweite von 35 SRES-Szenarien und beruhen auf mehreren Klimamodellen. Die projizierte Erwärmungsgeschwindigkeit steht, ausgehend von Paläoklimadaten innerhalb der letzten 10.000 Jahre, sehr wahrscheinlich außer Konkurrenz.²⁹ Insgesamt wird, so der IPCC- Bericht, der global gemittelte Wasserdampf und die Verdunstung ansteigen. Bis zur zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts werden die Niederschläge im Winter über den nördlichen mittleren bis hohen Breiten und der Antarktis wahrscheinlich zugenommen haben. In niedrigeren Breiten werden über den Landmassen sowohl regionale Zunahmen als auch Abnahmen festzustellen sein, wobei davon auszugehen ist, dass die bereits jetzt unter Wassermangel leidenden ariden und semiariden Gebiete noch trockener werden.³⁰ Weiterhin wird erwartet, dass extreme Wetter- und Klimaereignisse zunehmen.

Tabelle 2: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von projizierten Veränderungen extremer Wetter- und Klimaereignisse

Phänomene	Wahrscheinlichkeit der Änderungen während des 21. Jahrhunderts
Höhere Maximaltemperaturen, mehr heiße Tage und Hitzwellen über fast allen Landmassen	sehr wahrscheinlich
Höhere Minimaltemperaturen, weniger kalte Tage und Frosttage über fast allen Landmassen	sehr wahrscheinlich
Anstieg des Hitzeindex (Kombination von Temperatur und Luftfeuchtigkeit)	Sehr wahrscheinlich über den meisten Gebieten
Intensivere Niederschlagsereignisse	Sehr wahrscheinlich über vielen Gebieten
Zunehmende Sommertrockenheit über den meisten innerkontinentalen Flächen, verbunden mit dem Risiko von Dürren	wahrscheinlich
Verstärkte Dürren und Überschwemmungen in Verbindung mit El Niño-Ereignissen in vielen verschiedenen Regionen	wahrscheinlich
Verstärkung der Windspitzen in tropischen Zyklonen	wahrscheinlich über einigen Gebieten

Quelle: nach. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 53 (Tabelle4-1)

²⁹ Vgl. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 29.

³⁰ Vgl. ebd., S. 32-33.

Hinsichtlich einiger anderer extremer Phänomene, von denen viele beträchtliche Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft haben könnten, gibt es derzeit nur unzureichende Informationen, um jüngste Trends bewerten zu können. Außerdem verfügen die Klimamodelle noch nicht über die für zuverlässige Projektionen notwendige räumliche Auflösung. So werden beispielsweise sehr kleinräumige Phänomene wie Gewitter, Tornados, Hagel und Blitzschlag in Klimamodellen nicht simuliert.³¹

Aus dem ganzen Streubereich der SRES- Szenarien geht ein weiterer Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels um durchschnittlich 0,5m bis zum Ende des 21.Jahrhunderts hervor. Dies ist einerseits auf die thermale Ausdehnung der Ozeane und andererseits auf den Verlust an Masse bei Gletschern und Eiskappen zurückzuführen.³²

Neben dem weiteren Rückzug der Gletscher und Eiskappen im 21.Jahrhundert, prognostiziert die IPCC-Studie für diesen Zeitraum auch eine Abnahme des gegenwärtigen Ausmaßes der

Permafrostgebiete in der nördlichen Hemisphäre um 12-22%.³³

Schlussbetrachtung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die naturwissenschaftlichen Erkenntnisse über die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf das Klima und die daraus resultierenden Folgen weitestgehend abgesichert sind. Sicherlich kann zum einen nicht ausgeschlossen werden, dass die beobachtete und fortschreitende globale Erwärmung Folge einer natürlichen, in den letzten Jahrtausenden wiederholt angetroffenen Klimavariabilität ist, die ausschließlich auf natürliche, vielfach regelmäßig wiederkehrende Effekte zurückgeht. Zum anderen erfolgt der beobachtete Temperaturanstieg mit einer Geschwindigkeit, die derzeit durch eine natürliche Schwankung kaum zu erklären ist und deshalb auf anthropogene Eingriffe in das Klimasystem verweist.³⁴ Die neuen Erkenntnisse der renommierten Klimaforscher deuten vor allem auf folgende Korrelation hin: „Je weiter wir das Klima von seinem [...] Gleichgewicht wegtreiben, desto größer wird das Risiko von unangenehmen Überraschungen.“³⁵ Vor dem Hintergrund dieser Zusammenhänge hat sich in den letzten Jahren eine regelrechte Klimapolitik etabliert, die sich inzwischen wenigstens formal einer weltweiten Basis und Koordination erfreut. Im Zentrum steht vor allem die Reduzierung klimarelevanter Spurengasemissionen, zu der sich viele nationalstaatliche Regierungen verpflichtet haben. Allerdings halten einige Hauptverursacher wie zum Beispiel die USA die proklamierten Bestrebungen für ökonomisch nicht sinnvoll. Eine tragende Rolle beim Klimaschutz kommt der Europäischen Union und künftig vielleicht auch einigen Entwicklungsländern zu, wenn sie die dafür nötige Unterstützung durch die Industrienationen erfahren. Es bleibt jedoch mit einer gewissen Skepsis abzuwarten, inwiefern sich die ehrgeizige Ziele zum Schutze des Klimas letztlich in der Realität umsetzen lassen, ohne den Lobbyismus der Großkonzerne und Energieerzeuger sowie die in permanenter Konkurrenz stehenden gesellschaftspolitischen und individuellen Zielsetzungen zur Wohlstandsvermehrung und Verbesserung der Lebensverhältnisse in einem politisch nicht durchsetzbaren Maße zu konfrontieren.³⁶ Der aktuelle IPCC-Bericht will dazu beitragen, die Kluft zwischen Naturwissenschaftlern, Politikern und Ökonomen zu schließen, was die Chance für neue effektive Strategien erhöht. Auch wenn, wie bereits mehrfach erwähnt, eine weitere Klimaänderung im Grunde nicht mehr zu verhindern ist, sollten wir darin bestrebt sein, diese Änderung zumindest auf ein tolerierbares Maß zu beschränken. Dabei scheint eine Begrenzung der Temperaturzunahme um 1-2°C durchaus realistisch. Um ein solches Ziel zu erreichen sind noch drastischere Maßnahmen zum Klimaschutz erforderlich. Bei der Reduzierung der klimarelevanten Spurengasemissionen, sollten die sich Bemühungen weiterhin vor allem auf die CO₂-Emission konzentrieren, da

³¹ Vgl. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 50-52.

³² Vgl. ebd., S. 37.

³³ Vgl. IPCC Deutschland, Klimaänderung 2001: Synthesebericht, 2002, S. 55.

³⁴ Zudem weisen die paläoklimatologischen Daten auf ein relativ stabiles Klima in den letzten 10.000 Jahren hin.

³⁵ Vgl. Seiler, Ursachen anthropogener Klimaänderungen, 1992, S. 13 und 17.

³⁶ Rahmstorf, Treibhauseffekt und Klimawandel, 2001, S.12.

³⁷ Vgl. Paeth, Anthropogene Klimaänderungen, 2000, S. 3-4.

hier in jeglicher Hinsicht das größte Min-derungspotential vorhanden ist. Die Politik hat durch die Emissionssteuern bereits Rahmen-bedingungen geschaffen, die der Industrie Anreize geben, ihre Emissionen durch technische Innovationen zu reduzieren. Eine Methode wird von den Mineralölkonzernen schon seit Jah-ren praktiziert: Um Emissionssteuern zu sparen wird auf vielen Bohrseln in den Weltozea-nen das bei der Erdgasförderung anfallende CO₂ auf eine elegante Weise entsorgt. Täglich werden dort tonnenweise CO₂ zurück in den Meeresgrund gepumpt, wo poröse Gesteins-schichten das Gas aufnehmen.

Auch einige Staaten selbst, wie zum Beispiel Deutschland, die Niederlande oder Dänemark, haben sich seit Beginn der Neunzigerjahre im Rahmen der Verbesserung des Wirkungsgrades bei CO₂-emittierenden Prozessen durch Förderung von Kraft-Wärme-Kopplung und anderer effizienter Kraftwerkstechniken ausgezeichnet.

Dennoch sind die ergriffenen Maßnahmen bislang unzureichend, da es an einem umwelt- und wirtschaftspolitischen Gesamtkonzept mangelt. Eine interessante Alternative zu den Emis-sionssteuern wäre die weltweite Einführung eines Systems handelbarer Umweltzertifikate, die sich auf nationaler Ebene in einigen Ländern bereits bewährt haben. Der ökologische Vorteil der Zertifikate gegenüber den Steuern besteht darin, dass das umweltpolitische Ziel sicher erreicht werden kann, denn die politisch tolerierte Umweltbelastung ist im Umfang der aus-gegeben Rechte kontingentiert. Ein Unternehmen, das über die ihm zur Verfügung stehenden Emissionsrechte hinaus emittieren will, muss die erforderlichen Emissionslizenzen am Markt zukaufen, was nur möglich ist, wenn andere Emittenten bereit sind, Emissionszertifikate zu verkaufen. Als Folge von Angebot und Nachfrage stellt sich am Markt für die Nutzungsrechte ein Preis ein. Die Möglichkeit wiederum für ein Unternehmen Zertifikate an andere Unter-nehmen verkaufen zu können, ergibt sich, wenn es das Unternehmen schafft, seine Emis-sionen unter ihren Emissionsanteil zu senken. Durch diesen Ansatz werden also auch Anreize für Investitionen in umweltverträgliche Energien geschaffen. Obwohl ein solches ökonomi-sches Instrument zur Reduzierung von Treibhausgasen allgemein, und CO₂ im Besonderen, in der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur favorisiert wird, spielt es in der politischen Dis-kussion kaum eine Rolle.

Nicht zuletzt hat jeder Einzelne als Mitverursacher des globalen Klimawandels im Rahmen seiner Möglichkeiten einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Zu Hause gilt es möglichst sparsam mit Energie umzugehen. Beim Kauf technischer Geräte sind diejenigen mit einem optimalen Wirkungsgrad gegenüber den verschwenderischen Billigprodukten zu bevorzugen. Auch wenn die zwingend erforderliche Einstellung der Vernichtung der tropischen und bo-realen Wälder noch nicht Sicht ist, sollte jeder beim Kauf von Holzprodukten überprüfen, ob diese auch aus nachwachsenden Beständen entstammen. Das finale Ziel von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft sollte es sein, den zukünftigen Ge-nerationen eine Welt zu hinterlassen, die uns vertraut und lebenswert ist. Vor diesem Hin-tergrund sind ein weiteres Zögern und Zaudern auf dem Gebiet des Klimaschutzes und tief-greifende Eingriffe in unser Klimasystem politisch und ethisch nicht mehr vertretbar.

(Patrick Zopf)

Literaturverzeichnis:

Monographien/Sammelbände:

- + Albert, Mathias: Entgrenzung und internationale Beziehungen, in: Hellmann, Günther u.a.(Hrsg.): Die neuen internationalen Beziehungen. Forschungsstand und Perspektiven in Deutschland (Aus der Reihe: Weltpolitik im 21. Jahrhundert Bd.10), Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft, 2003, S. 555-573.
- + Deutsche IPCC Koordinierungsstelle des BMBF und des BMU (Hrsg.): Klimaänderung 2001. Synthesebericht, Bonn: DERS. Hrsg., 2002.
- + Houghton, John: Globale Erwärmung. Fakten, Gefahren und Lösungswege, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- + Johann, Michael: Die Auswirkungen des Klimawandels auf Österreich, Wien: Greenpeace Österreich, 1993.
- + Latif, Mojib: Hitzerekorde und Jahrhundertflut. Herausforderung Klimawandel, München: Heyne Verlag, 2003.
- + Paeth, Heiko: Anthropogene Klimaänderungen auf der Nordhemisphäre und die Rolle der Nordatlantik-Oszillation, in: Hense, Andreas (Hrsg.): Bonner Meteorologische Abhandlungen, Heft 51, St. Augustin: Asgard Verlag, 2000.
- + Quenzel, Heinrich: Ausprägungen anthropogener Klimaänderungen und ihre Auswirkung auf die Biosphäre, in: Hanns-Seidel-Stiftung e.V.: Politische Studien. Klimakatastrophe oder Sensationsgier. Wie entwickelt sich unser Wetter wirklich? (Zweimonatsschrift für Politik und Zeitgeschehen, Sonder heft 2), München: Pflaum Verlag, 1992, S.22-31.
- + Rahmstorf, Stefan: Treibhauseffekt und Klimawandel, in: Ernst-Abbe-Stiftung (Hrsg.): Schriftenreihe der Ernst-Abbe-Stiftung, Heft 22, Jena: Mayer Verlags GmbH, 2001.
- + Rotte, Ralph: Global Warming, nationale Sicherheit und internationale politische Ökonomie. Überlegungen zu den Konsequenzen der weltweiten Klimaveränderung für Deutschland und Europa. (Aktuelle Analysen, 22), München: Hanns-Seidel-Stiftung e.V., 2001.
- + Seiler, Wolfgang: Ursachen und zeitliche Entwicklung anthropogener Klimaänderungen, in: Hanns-Seidel-Stiftung e.V.: Politische Studien. Klimakatastrophe oder Sensationsgier. Wie entwickelt sich unser Wetter wirklich? (Zweimonatsschrift für Politik und Zeitgeschehen, Sonder heft 2), München: Pflaum Verlag, 1992, S. 6-21.

Internet-Dokumente:

- + Kasang, Dieter: Temperaturzunahme im 20.Jahrhndert. 5.03.2004. Online im Internet: URL: <http://www.hamburger-bildungsserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/infothek.htm> [August 20005].
- + Rahmstorf, Stefan: Klimawandel-Rote Karte für die Leugner. 1.Quartal 2003. Online im Internet: URL: <http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Other/klimageschichte.pdf> [August 2003].
- + Simonis, Udo: Klimawandel-eine weltweite Gefährdung. 2002. Online im Internet: URL: http://www.bpb.de/publikationen/1HXEGQ,0,0,Klimawandel_%96_eine_weltweite_Gef%E4hrdung.html [Mai 2005].
- + Umweltbundesamt (Hrsg.): Globaler Klimawandel. Klimaschutz 2004. Mai 2004. Online im Internet: URL: <http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2695.pdf>. [Juli 2005]