

Facharbeit im Leistungskurs Erdkunde

Thema: "Globale Klimaveränderungen - Ursachen, Auswirkungen und Maßnahmen"

© 1996 by [Philipp Schneider](#). Alle Rechte vorbehalten.

A. Eine Klimaveränderung als zukünftiges globales Problem

Das Klima unserer Erde variiert nicht nur in geographischer, sondern auch in zeitlicher Hinsicht. Neben den vielen verschiedenen klimatischen Zonen, die auf ihr existieren, ist das Klima schon seit annähernd 4 Milliarden Jahren, also seit Entstehen der Erde in ständiger Veränderung. Diese sogenannten "natürlichen Klimaveränderungen" hatten jedoch kaum negativen Einfluß auf die Biosphäre, d.h. den gesamten Raum aller lebenden Wesen, weil sie über extrem lange Zeiträume stattfanden und die Umwelt sich so an sie anpassen konnte.

Doch diese Harmonie wird von der Menschheit gestört, die ohne Rücksicht auf ihren eigenen Lebensraum ständig darum bemüht ist, ihren Lebensstandard zu erhöhen. Schon im Jahre 1827 hat Fourier vor einer extremen Industrialisierung und Modernisierung und den damit verbundenen stark erhöhten Kohlendioxid-Emissionen gewarnt und diese mit einer möglichen globalen Klimaveränderung in Zusammenhang gebracht (Bach/Krause/Koomey, 1992, S.17). Und auch trotz vieler weiterer Warnungen von anerkannten Wissenschaftlern wurden bisher noch keine wirksamen Maßnahmen gegen diese getroffen. Wenn auch weiterhin so gehandelt wird, kann sich eine weltweite Klimaveränderung schnell zum gefährlichsten Problem entwickeln, das die Erde jemals bedroht hat. Die Aufgabe dieser Arbeit soll es nun sein, nach einer kurzen Erläuterung der natürlichen Klimaveränderungen auf die Ursachen und Auswirkungen einer anthropogenen, d.h. einer vom Menschen verursachten Klimaveränderung einzugehen und vor allem Maßnahmen aufzuzeigen, die diese - wenn auch nicht mehr ganz verhindern - so doch einschränken können.

B. Klimaveränderungen in Vergangenheit und Zukunft

1. Natürliche Klimaveränderungen

Um eine anthropogene Klimaveränderung als solche erkennen und in Relation setzen zu können, ist es notwendig, zuerst die natürlichen Klimaschwankungen zu erläutern und sich somit ein Bild der Klimageschichte auf der Erde zu machen.

1.1 Die drei Arten von natürlichen Klimaschwankungen

Bei natürlichen Klimaveränderungen differenziert man grundsätzlich zwischen drei verschiedenen Schwankungen, die sich nur in ihrer Dauer und ihrem Ausmaß unterscheiden: Das sind die Eiszeitalter bzw. Warmklimate, die Kalt- bzw. Warmzeiten und die Stadiale bzw. Interstadiale.

1.1.1 Eiszeitalter und Warmklimate

Die Eiszeitalter und Warmklimate sind die langsamsten Vorgänge der Klimageschichte. Sie sind Teil der allmählichen Abkühlung der Erde, die aus der fortwährenden Abgabe der Erdwärme resultiert. So kam es vor ca. 2,3 Milliarden Jahren erstmals in der Erdgeschichte zu einem Eiszeitalter, d.h. zu einer Situation in der Kaltzeiten (auch oft fälschlicherweise Eiszeiten genannt) auftraten, nachdem bisher ein Warmklima ohne Eiszeiten vorherrschte. Nach diesem ersten, sogenannten "Archaischen Eiszeitalter" gab es von vor ca. 1 Milliarde Jahren vor heute bis zur Gegenwart sechs weitere Eiszeitalter .

Die Gründe für das Auftreten von Eiszeitaltern sind noch nicht vollkommen geklärt, es scheint sich jedoch die Theorie der Kontinentaldrift als wichtigste Hypothese durchzusetzen. Diese beruht auf der Tatsache, daß die Lage der Kontinente auf der Erde über die Jahrtausende ihrer Geschichte keineswegs gleichgeblieben ist. Vielmehr verschieben sie sich mit der Zeit - ausgehend von einer Art "Urkontinent" namens "Gondwana", der in verschiedene Teile zerbrochen ist und somit die heutigen Kontinente gebildet hat. Die Theorie der Kontinentaldrift erklärt die Eiszeitalter nun so, daß sich auf einem Kontinent, der während seiner Verschiebung den Nord- oder Südpol der Erde erreicht, Niederschlag in Form von Schnee und damit auch Eis ablagern kann. Dadurch vergrößert sich die sogenannte Albedo, d.h. die Reflexionsfähigkeit der Erdoberfläche für das Sonnenlicht, da Eis aufgrund seiner Helligkeit viel Licht reflektiert. Die Erde wird nun also durch weniger Sonnenlicht erwärmt, wobei noch mehr Niederschlag in Form von Schnee fällt und die Albedo weiterhin vergrößert. Dies hat nun also ein Eiszeitalter zur Folge, das erst wieder enden kann, wenn sich der auslösende Kontinent von dem Pol der Erde entfernt und dem Niederschlag somit keine Möglichkeit mehr gegeben ist, sich als Eis abzulagern.

1.1.2 Kalt- und Warmzeiten

Die Kalt- und Warmzeiten, die auch oft fälschlicherweise als Glaziale oder Interglaziale bezeichnet werden, sind nun eine Art Unterordnung der Eiszeitalter und finden innerhalb dieser statt. Während also ein Eiszeitalter das Klima relativ zum ursprünglichen Warmklima beschreibt, sind Kalt- und Warmzeiten Epochen unterschiedlichen Klimas während einem Eiszeitalter. Auch zeitlich unterscheiden sie sich: Die Eiszeitalter dauern im Durchschnitt 100 bis 200 Millionen Jahre an; die Kalt- und Warmzeiten lösen sich dagegen in einem Zeitraum von ungefähr 50000 bis 70000 Jahren ab. Obwohl in allen Eiszeitaltern Kalt- und Warmzeiten entstanden sein müssen, so ist dies doch nur im bisher letzten, dem Quartären Eiszeitalter nachgewiesen, das vor ungefähr 2-3 Millionen Jahren vor heute begann. In den letzten 500000 Jahren, die besonders gut untersucht wurden, sind allein 5 Warm- und 4

Kaltzeiten zu finden. In der Gegenwart befinden wir uns also in der sogenannten Neo-Warmzeit innerhalb des Quartären Eiszeitalters. (Zahlen nach Schönwiese, 1992, S.44/50/51)

Es gibt zwar viele verschiedene Theorien, die die Kalt- und Warmzeiten begründen wollen, es hat sich jedoch die sogenannte "Orbitalhypothese" oder auch "Milankovic-Hypothese" (nach ihrem Entdecker Milutin Milankovic) durchgesetzt. Diese Theorie besagt, daß Kalt- und Warmzeiten auf Änderungen der Erdbahnparameter zurückzuführen sind. Diese Parameter sind die Exzentrizität der Erdumlaufbahn, die Erdachsenneigung und die Lage der Erdachse im Raum, der sogenannten Präzession.

Die Umlaufbahn der Erde um die Sonne ist kein richtiger Kreis, sondern eine Ellipse, die eine bestimmte Exzentrizität besitzt. Diese schwankt nun in einem langfristigen Zyklus von ungefähr 96000 Jahren und stellt somit den ersten Orbitalparameter dar. Hinzu kommen die beiden Milankovic-Zyklen: Die Erdachsenneigung gegenüber der Ekliptik, also der imaginären Ebene in der die Erde um die Sonne kreist, schwankt in einem Zyklus von ca. 40000 Jahren zwischen einem Winkel von 21,8° und 24,4° (Schönwiese, 1992, S. 54). Der zweite Milankovic-Zyklus heißt auch Präzession: Er beschreibt die Veränderung der Lage der Erdachse im Raum. Diese führt in einem Zeitraum von ungefähr 25800 Jahren eine Art "Kreiselbewegung" aus.

Diese drei Parameter, die zusammen auch als "Orbitalparameter-Variationen" bezeichnet werden, verursachen also eine Änderung der Sonneneinstrahlung auf die Erde, die während einem Eiszeitalter zu Warm- und Kaltzeiten führt.

1.1.3 Stadiale und Interstadiale

Die Stadiale und Interstadiale kann man als zweite "Unterart" in der weltweiten Klimageschichte beschreiben. So bezeichnet man Klimaschwankungen, die während einer Kaltzeit stattfinden und damit eine weitere Differenzierung ermöglichen. Die Gründe für die Stadiale (relativ kalte Epochen) und Interstadiale (relativ warme Epochen) sind noch kaum untersucht. Ihnen wird jedoch auch keine große Bedeutung zugemessen, da sie als ziemlich geringe Temperaturveränderungen durch die gesamte Klimageschichte hindurch zu finden sind. Sie sollen deshalb hier auch nicht weiter behandelt werden.

1.2 Die Folgen der natürlichen Klimaveränderungen

Bei den Folgen der natürlichen Klimaveränderungen muß man differenzieren. Es gibt nur sehr wenige Daten über weit zurückliegende Klimaschwankungen, weshalb hier nur sehr allgemeine Aussagen gemacht werden können: Die natürlichen Klimaschwankungen mit relativ großem Ausmaß erstreckten sich über so lange Zeiträume, daß die Biosphäre sich an die veränderten Lebensumstände gut anpassen konnte und so keine wirklich negativen Folgen auftraten.

Andererseits beschäftigen sich heute Klimahistoriker sehr wohl mit geringen Veränderungen des Klimas, die in den letzten Jahrhunderten stattgefunden haben. So kann das Klima zum Beispiel ein Faktor dafür sein, daß während einer relativ warmen Periode der heutigen Neo-Warmzeit um 6500 v.Chr. die Menschen sesshaft wurden und die ersten Hochkulturen in Nordafrika entstanden. Auch bei den Völkerwanderungen in Europa um 500 n.Chr kann eine klimatische Abkühlung, die um diese Zeit stattfand, eine Rolle gespielt haben.

Grundsätzlich kann man also sagen, daß natürliche Klimaveränderungen zwar einerseits die Biosphäre und vor allem auch die Menschheit beeinflusst haben, daß sie sich aber andererseits auch in einem relativ konstanten Rahmen bewegen, der nicht überschritten wird. Somit wird man hier - ganz im Gegensatz zu den anthropogenen Klimaveränderungen - nicht von einer "Klimakatastrophe" sprechen.

2. Anthropogene Klimaveränderungen am Beispiel der globalen Erwärmung durch den Treibhauseffekt

Die natürlichen Klimaveränderungen sind aber nun nicht die einzigen Schwankungen, denen unser Klima unterworfen ist: Auch der Mensch beeinflusst das Klima durch den sogenannten Treibhauseffekt. Nun sollen zuerst dessen Gründe erörtert werden, sodann die Auswirkungen einer solchen globalen Erwärmung erläutert und schließlich Maßnahmen zur deren Vermeidung beschrieben werden.

2.1 Die Ursachen der globalen Erwärmung

2.1.1 Wirkungsweise des Treibhauseffekts in der Atmosphäre

Der Begriff Treibhauseffekt beschreibt die Vorgänge in der Atmosphäre, die zu einer globalen Erwärmung führen, recht anschaulich: Das auf die Erde treffende Sonnenlicht und die mit ihm geführte Energie lassen die Erdoberfläche Infrarotstrahlung aussenden, die wie in einem Treibhaus in der Atmosphäre durch bestimmte Gase, den sogenannten Treibhausgasen, davon abgehalten wird, in den Weltraum zu entweichen. Dies führt zu einer Erwärmung der umliegenden Luftschichten und damit der gesamten Atmosphäre.

2.1.2 Der natürliche Treibhauseffekt

Wenn hier oder in anderen Publikationen von Treibhauseffekt gesprochen wird, so ist fast immer eine anthropogene Klimaveränderung während der letzten hundert Jahre gemeint. Dies ist jedoch nicht der eigentliche Treibhauseffekt, sondern nur eine Verstärkung: Es ist bekannt, daß schon bald nach Entstehung der Erde vor ungefähr 3,5 Milliarden Jahren ein natürlicher Treibhauseffekt als Folge einer bestimmten Spurengaskonzentration in der Atmosphäre eingesetzt hat, der zu einer "Nettoerwärmung der Erde von etwa 33° C" (Borsch/Wiedemann, 1992, S.32) geführt hat und der somit eine wichtige Rolle für sämtliches Leben auf der Erde spielt. Denn das Ausbleiben dieses Effektes würde in einer lebensfeindlichen globalen Durchschnittstemperatur von ungefähr -18° C anstelle der heutigen 15° C resultieren. Die Hauptursache für diesen sehr willkommenen "Nebeneffekt" ist der atmosphärische Wasserdampf, der mit 62 % am natürlichen Treibhauseffekt beteiligt ist. Außerdem spielen hierbei Kohlendioxid mit 22 %, bodennahes Ozon mit 7 % und weitere Spurengase mit 9 % eine Rolle (Schönwiese, 1992, S.136). Einige dieser

Gase sind auch die Ursache des anthropogenen Treibhauseffektes und werden somit als Treibhausgase bezeichnet. Sie sollen nun näher behandelt werden.

2.1.3 Der anthropogene Treibhauseffekt

Gefährlicher als der natürliche ist der anthropogene (oder auch zusätzliche) Treibhaus-effekt. Er entsteht durch eine vom Menschen verursachte Erhöhung der Spurengaskonzentration in der Atmosphäre. Die über die Jahrtausende immer relativ konstante Strahlungsbilanz des Systems Erdoberfläche-Atmosphäre wird durch diese Erhöhung gestört, da noch weniger von der Erde ausgesandte Infrarotstrahlung die Atmosphäre verlassen kann und sich diese somit erwärmt. Somit spielt die Konzentration der Spurengase in der Atmosphäre eine sehr wichtige Rolle für das Klima und damit für die gesamte Biosphäre. Diese sogenannten Treibhausgase sollen nun im Folgenden genauer betrachtet und im einzelnen deren Quellen und Wirkungsweisen analysiert werden.

2.1.4 Die Quellen und Wirkungsweisen der einzelnen Treibhausgase

"Treibhausgase sind Gase, die bewirken, daß Infrarotstrahlung in der Atmosphäre zurückgehalten wird, so daß die Erdoberfläche sowie der untere Bereich der Atmosphäre sich erwärmen" (Leggett u.a., 1991, S. 33). Zu dieser Gruppe von Gasen gehören: Kohlendioxid (CO₂), Fluorchlorkohlen(wasser)stoffe (FCK und FCKW), Methan (CH₄), Ozon (O₃), Distickstoffoxid (N₂O) u.a..

Sorry, Bild fehlt!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

Abbildung 1: Anteile der einzelnen Treibhausgase am anthropogenen Treibhauseffekt

Quelle: Schott u.a., 1990, S. 20

Wie in Abbildung 1 ersichtlich, ist Kohlendioxid mit 50% Beteiligung am anthropogenen Treibhauseffekt das gefährlichste Treibhausgas; danach folgen die FCKW und das Methan mit jeweils 19%, Ozon mit 8% und schließlich das Distickstoffoxid mit 4% Anteil.

Das mit Abstand wichtigste Treibhausgas ist jedoch wie schon gesagt das Kohlendioxid (CO₂). Es entsteht sowohl auf natürlichem, als auch auf unnatürlichem Wege, nämlich dem Verbrennen von fossilen Energieträgern, d.h. von Kohle, Erdöl und Erdgas als auch durch Waldrodung. Der Ozean und die Biosphäre sind die wichtigsten sogenannten "Senken", d.h. Systeme, die das Kohlendioxid, welches zu ungefähr 96% natürlichen Ursprungs ist, aufnehmen. (Krause u.a., 1992, S.23). Die restlichen 4% entstammen den Emissionen des Menschen. Die heutige Zuwachsrate des CO₂ beträgt ca. 0,5% pro Jahr (Borsch/Wiedemann, 1992, S.35).

Die wichtigsten natürlichen Quellen des Kohlendioxids, das eine atmosphärische Verweilzeit von ca. 6-10 Jahren in der Troposphäre besitzt (Gerosa, 1987, S.156) sind die Atmung der Lebewesen, der Gasaustausch der Ozeane, und Vulkanausbrüche. Die atmenden Lebewesen tragen somit ihren Teil zum CO₂-Ausstoß bei: Sie erzeugen mittels Glucose und Sauerstoff die zum Leben benötigte Energie, aber geben gleichzeitig Kohlendioxid als "Abfallprodukt" ab. Auch das Wasser enthält CO₂, d.h. die Ozeane können gewaltige Mengen an Kohlendioxid aufnehmen. Jedoch beträgt dieser absorbierte Anteil der weltweiten Kohlendioxid-Emissionen nur 50%; die andere Hälfte verbleibt in der Atmosphäre (Gerosa, 1987, S.139). Außerdem tragen auch Vulkanausbrüche mit einem geringen Anteil zum natürlichen Kohlendioxid-Ausstoß bei.

Wichtiger in Bezug auf den anthropogenen Treibhauseffekt sind jedoch die vom Menschen verursachten Kohlendioxid-Quellen, d.h. die Verbrennung fossiler Energieträger sowie die Waldrodung. Denn diese verursachen - im Gegensatz zu den natürlichen CO₂-Quellen, die sich in einem relativ konstanten Rahmen bewegen - eine Erhöhung der globalen Kohlendioxid-Emissionen und damit einen Anstieg dieses Treibhausgases in der Atmosphäre. Das durch Verfeuerung fossiler Brennstoffe wie Öl, Kohle und Erdgas auftretende Kohlendioxid entsteht vor allem durch Kraftwerke (35%), aber auch durch Kleinverbraucher (24%), Verkehr (17%), Industrie (14%) und Raffinerien bzw. Hochöfen (10%) (Gaber/Natsch, 1989, S.62).

Potentielles CO₂ ist aber auch in Form von Kohlenstoff gespeichert, denn da jedes Lebewesen auf Kohlenstoffbasis aufgebaut ist, kommt es nach dessen Tod zu einer Verbindung des Kohlenstoffs mit dem Sauerstoff der umgebenden Luft zu Kohlendioxid. Dies gilt besonders für die gewaltige Biomasse der tropischen Regenwälder und deren somit riesigem CO₂-Potential. Die Rodung dieser Wälder, wie sie ja in den Entwicklungsländern in großem Maße betrieben wird, stellt hiermit eine weitere wichtige anthropogene Quelle des Kohlendioxids dar.

Sorry, Bild fehlt!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

Abbildung 2: Atmosphärische Kohlendioxidkonzentration

Quelle: C.D. Schönwiese, 1992, S. 138

In Abbildung 2 erkennt man deutlich die Zunahme des CO₂ in der Atmosphäre während der letzten Jahrhunderte. Seit Ende des 18. Jahrhunderts, also seit Beginn der Industrialisierung und dem damit erhöhtem Energieverbrauch in Mitteleuropa ist die atmosphärische Kohlendioxid-Konzentration laufend gestiegen. Ungefähr seit 1960 jedoch, also seit Aufnahme der Messungen auf dem Mauna Loa auf Hawaii, ist ein extrem starker Anstieg zu verzeichnen, der wohl aus einem weiter erhöhten Verbrauch fossiler Energieträger, sowie dem Beginn industrieller Rodung der

tropischen Regenwälder resultiert. In der Messung seit 1960 ist auch eine jahreszeitliche Schwankung des atmosphärischen Kohlendioxidgehalts festzustellen. Diese ist ein Folge der jahreszeitlichen Anpassung der Vegetation, da die Pflanzen im Frühjahr zum Wachsen mehr Kohlendioxid benötigen, während sie dieses im Herbst wieder abgeben.

Ein weiteres wirksames Treibhausgas sind die Fluorchlor(kohlen)-wasserstoffe (FCKW F-11 und F-12). Obwohl sie meist nur mit der Zerstörung der Ozonschicht in Zusammenhang gebracht werden, sind diese auch mit ungefähr 19 % (Blanck u.a., 1990, S.20) am anthropogenen Treibhauseffekt beteiligt. Diese Gase entstehen nicht auf natürlichem Wege, d.h. sie werden ausschließlich vom Menschen erzeugt. Sie werden seit ihrer Einführung 1935 vor allem im Bereich der Industrie als Reinigungs- und Lösungsmittel und zur Aufschäumung von Kunststoffen benötigt. Mit ca. 64000 t FCKW in Deutschland übersteigt dieser industrielle Sektor weit den privaten Gebrauch in Klimaanlage sowie Spraydosen mit zusammen nur 11700 t (Zahlen nach Gaber/Natsch, 1989, S.99). Die gegenwärtige Konzentration von F-11 und F-12 in der Atmosphäre beträgt - im Gegensatz zu CO₂ mit 346000 ppb - nur 0,2 bzw. 0,32 ppb und erscheint damit recht gering. Man sollte jedoch nicht vergessen daß die FCKW pro Molekül auch einen um 14000 bis 20000fach erhöhten Wirkungsgrad im Verhältnis zu Kohlendioxid erzielen (Krause u.a., 1992, S.27/30/32) und mit 65 bis 110 Jahren eine lange Verweildauer in der Atmosphäre besitzen. Außerdem liegt die Zuwachsrate der FCKW mit 5% pro Jahr sehr hoch (Krause u.a., 1992, S.30). Obwohl die FCKW also einen gewissen Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt haben, liegt ihre Hauptgefahr doch bei der Zerstörung der Ozonschicht. Das Ozonloch entsteht also auch durch eine Veränderung der Spurengase in der Atmosphäre, die Folge ist jedoch das vermehrte Auftreten von gefährlichem UV-Licht auf die Erdoberfläche. Demnach kann man dieses Problem im engeren Sinne nicht als eine "Klimaveränderung" bezeichnen, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen werden soll.

Methan (CH₄) ist ebenfalls ein sehr wirksames Treibhausgas: Obwohl es nur mit ca. 1,7 ppm (Rabe, 1990, S.54) in der Atmosphäre vertreten ist, trägt es mit 19 % (Blanck u.a., 1990, S.20) zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Diese hohe Effektivität resultiert aus der mit 7-10 Jahren relativ langen Verweildauer in der Atmosphäre und dem 25-32fachen klimatischen Wirkungsgrad im Vergleich zu Kohlendioxid. Außerdem besitzt Methan eine jährliche Zuwachsrate von 1,5% (Schönwiese, 1987, S. 91). Allgemein entsteht Methan durch Gärung und Fäulnis, also "durch biologische Prozesse beim Abbau organischer Stoffe" (Gerosa, 1987, S.149). Solange es nur natürliche Quellen des Methans, wie z.B. Sumpfgebiete und wenig durchlüftete Meere gab, konnte die Methankonzentration in der Atmosphäre nicht ansteigen, da es einen natürlichen Abbaumechanismus gab. Allerdings sind mehr als die Hälfte der Gesamtemissionen anthropogenen Ursprungs, denn Methan entsteht auch durch Reisfelder, durch Mägen wiederkäuender Tiere (vor allem Rinder), beim Verbrennen von Biomasse, auf Mülldeponien und schließlich entweicht es durch Erdgaslecks.

Trotz der relativ hohen klimatischen Wirkung eines O₃-Moleküls vom 2000fachen im Verhältnis zu Kohlendioxid leistet das Spurengas Ozon mit 8% (Rabe, 1990, S.59) einen relativ geringen Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt. Dies liegt an der mit 0,02 bis 0,1 ppm (Krause u.a., 1992, S.30) relativ geringen Konzentration in der Troposphäre und der mit einigen Stunden bis Tagen relativ kurzen Verweildauer in der unteren Atmosphäre. Ozon selbst besitzt keine natürlichen Quellen. Es entsteht vielmehr in Abhängigkeit von Sonnenstrahlung und Stickoxiden sowie Kohlenwasserstoffen.

Als letztes Treibhausgas soll hier das Distickstoffoxid (N₂O), das auch Lachgas genannt wird, besprochen werden. Mit 4% Anteil am zusätzlichen Treibhauseffekt und ca. 0,31 ppm Konzentration in der Atmosphäre ist es das harmloseste der besprochenen Treibhausgase. Allerdings besitzt es eine klimatische Wirkung von 150-250 im Verhältnis zu CO₂ und eine relativ hohe atmosphärische Verweildauer von ca. 170 Jahren. Distickstoffoxid entsteht allgemein durch Verbrennungsprozesse sowie Bakterien im Boden. Die Konzentrationserhöhung von 0,2 bis 0,3 % pro Jahr (Zahlen nach Krause u.a., 1992, S.27/29) resultiert aus einer ansteigenden Verwendung von künstlichen Düngemitteln in der Landwirtschaft. Hier wandelt sich der stickstoffhaltige Dünger durch verschiedene chemische Prozesse in Distickstoffoxid um.

2.1.5 Die Rolle des Bevölkerungswachstums

Abschließend kann man sagen, daß der Anstieg aller dieser Treibhausgase auch durch das Bevölkerungswachstum bedingt ist. Die regelrechte "Bevölkerungsexplosion" in den Entwicklungsländern und deren teilweise Industrialisierung zu Schwellenländern hat ihren Beitrag dazu geleistet, daß die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre sich erhöht. Vermehrter Energiebedarf läßt den Kohlendioxidgehalt ansteigen. Die Ausweitung der Landwirtschaft, um die wachsende Bevölkerung zu ernähren wird weiter erhöhte Methan- und Distickstoffoxid-Emissionen zur Folge haben. Ohne die Schuld der westlichen Industrienationen am anthropogenen Treibhauseffekt mindern zu wollen, muß man also sagen, daß die zukünftige Gefahr auch in einem weiteren, ökologisch unbedachten, industriellen Ausbau der Entwicklungsländer liegen kann. Natürlich müssen die Industrieländer vor allem ihre eigenen Gewohnheiten ändern, aber langfristig gesehen sollte die Entwicklungshilfe der Industrieländer auch im Bereich des Technologie-Transfers ansetzen, um eine Verstärkung der Treibhausgas-Emissionen in den Entwicklungsländern noch rechtzeitig eindämmen zu können.

2.2 Die Auswirkungen und Folgen einer globalen Erwärmung

Nachdem die Gründe und Ursachen des Treibhauseffekts erläutert worden sind, sollen nun die Auswirkungen und Folgen einer solchen globalen Erwärmung analysiert werden. Hierbei ist eine Differenzierung in drei Aspekte nützlich: Man unterscheidet einerseits die "primären Folgen", also unmittelbar das Klima und die

Oberflächentemperatur der Erde betreffende Auswirkungen, andererseits die "sekundären Folgen", d.h. Konsequenzen für Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre und Atmosphäre und schließlich noch die "tertiären Folgen", also Auswirkungen auf den Menschen.

2.2.1 Auswirkungen auf Klima und Oberflächentemperatur (Primäre Folgen)

Wie schon gesagt hindern die Treibhausgase, die mit immer höherer Konzentration in der Atmosphäre vorhanden sind, die von der Erdoberfläche ausgesandte Infrarotstrahlung daran, in den Weltraum zu entweichen. Hieraus folgt natürlich eine Aufheizung der Troposphäre, vor allem der bodennahen Luftschichten und letztendlich auch der Erdoberfläche. Die Berechnung des Ausmaßes dieser Erwärmung gestaltet sich aufgrund der Komplexität des globalen Klimageschehens als sehr schwierig und reicht daher in den verschiedenen Klimasimulationen von "sehr gering" bis "extrem". Die am meisten verbreitete und wohl auch anerkannteste Berechnung ist die des 1988 gegründeten "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC), der einen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur zwischen 1,5° und 4,5° C (IPCC, 1990) bei Verdopplung der Kohlendioxidkonzentration im Vergleich zu den vorindustriellen Werten prognostiziert (siehe auch Abbildung 3). Ohne die Einleitung entsprechender Maßnahmen wäre diese Verdopplung im schlimmsten Fall bereits um 2030 erreicht (Leggett u.a., 1990, S.140). Unter Berücksichtigung diverser noch zu besprechender "positiver Rückkopplungen" kann sogar ein Betrag der globalen Erwärmung von 6,3° bis 8° C (Krause u.a., 1992, S.42) als realistisch angesehen werden. Bei der Betrachtung dieser Werte ist es jedoch unerlässlich, sie als "globale Mittelwerte" zu deklarieren. Die tatsächliche regionale Erwärmung wird extrem unterschiedlich ausfallen, wie man in Abbildung 3 an der globalen Verteilung sehen kann. Abgesehen davon, daß die Erwärmung ihr höchstes Ausmaß im Winter erreicht, wird sie vom Äquator zu den Polen hin zunehmen. In den tropischen Gebieten wird sich die Erwärmung somit auf 2° bis 4° C beschränken, während sie in höheren polaren Breiten durchaus bis zu 10° C betragen kann (Blanck u.a., 1990, S.30). Betrachtet man nach dem IPCC-Report 3° C bis 2100 als realistischen Wert einer globalen Erwärmung, so ergibt sich eine Änderungsrate von etwa 0,3° C pro Jahrzehnt - ein durch natürliche Klimaveränderungen noch nie erreichter Wert. Doch seit der industriellen Revolution hat die globale Durchschnittstemperatur bereits um 0,7° C zugenommen, was für Klaus Hasselmann vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg ein eindeutiger Beweis für eine anthropogene Klimaveränderung ist: Mit 95% schätzt er "die Wahrscheinlichkeit, daß die Erwärmung auf externe Einflüsse zurückzuführen ist" (Christian Schütze, SZ-Dokumentation, 24. März 1995, S.12).

2.2.2 Auswirkungen einer globalen Erwärmung auf Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre und Atmosphäre (Sekundäre Folgen)

Neben diesen primären Folgen einer globalen Erwärmung durch den Treibhauseffekt gibt es jedoch auch die sekundären Folgen: Sie beziehen sich vor allem auf die Atmosphäre, die Hydrosphäre, also auf die Wasserhülle der Erde, auf die Kryosphäre, d.h. die Eiskappen, Gletscher sowie Permafrostböden und schließlich noch auf die Biosphäre, also den "Bereich auf und nahe der Oberfläche der Erde, in dem alles Leben - die Gesamtheit aller lebenden Organe - existiert" (Leggett u.a., 1991, S.552).

Die in den Medien wohl am häufigsten diskutierte Gefahr, die eine Erwärmung mit sich bringen würde, ist die eines globalen Anstiegs des Meeresspiegels. Wichtig ist hierbei, daß dies weniger die Folge des Abschmelzens von Landeis (vor allem der Antarktis, Grönlands und von Gletschern), als vielmehr die Auswirkung einer thermischen Ausdehnung des Meerwassers ist. Wie alle Materie dehnt sich auch Wasser bei Erwärmung aus und verursacht so einen "Anstieg des Meeresspiegels um 0,5 bis 1,5 m während der nächsten Jahrzehnte und langfristig sogar um mehrere Meter" (Krause u.a., 1992, S.44). Das Abschmelzen des Landeises der Antarktis und Grönlands ist zwar theoretisch bei hohen Erwärmungswerten auch möglich, jedoch würde solch ein Vorgang mehrere Tausend Jahre beanspruchen. Das Eis alpiner Gletscher würde zwar schneller schmelzen, es ist jedoch zu vernachlässigen, weil es im Vergleich zu den Ozeanen nur eine relativ geringe Menge Wasser enthält. Die Gefahr eines Meeresspiegelanstiegs liegt nun darin, daß tiefgelegene Regionen und ganze Länder von Überschwemmungen heimgesucht werden, wodurch sich viele negative Folgen für Siedlungen, Häfen und Tourismus, aber auch für küstennahe Süßwasserreservoirs und Landwirtschaft ergeben. Dies betrifft weniger Industrieländer wie zum Beispiel die Niederlande, da diese sich durch entsprechende Deichbauten schützen können, sondern vielmehr arme Entwicklungsländer wie Bangladesch oder auch Inselstaaten wie die Malediven, Tuvalu und Kiribati, also Staaten, die am allerwenigsten zum anthropogenen Treibhauseffekt beigetragen haben.

Ein Problem, welches nicht unbedingt mit einem Meeresspiegelanstieg zu tun hat, aber dennoch die Hydrosphäre betrifft, ist die Verschiebung von Meeresströmungen. Durch die globale Erwärmung könnte sich beispielsweise der Golfstrom in seiner Lage ändern oder sogar vollkommen zum Erliegen kommen. Dies hätte extreme Konsequenzen für das europäische Klima, da der Golfstrom der "Wärmelieferant" Europas ist. Allerdings ist die Vorhersage solcher Ereignisse aufgrund der Komplexität des globalen Klimageschehens ziemlich unsicher und nur durch Hypothesen gestützt.

Eine weitere Folge einer globalen Erwärmung ist die Verschiebung von Vegetationszonen. Dies hätte dramatische Auswirkungen für die Flora der Erde, besonders aber für sehr spezialisierte Pflanzen, die nicht die Möglichkeit haben, schnell in Gebiete höherer Breiten "zu ziehen", die für sie in einem wärmeren Klima günstiger wären. Daraus würde ein Verlust an Artenvielfalt resultieren, weil Pflanzenarten, die sich leicht an veränderte Umgebungsbedingungen anpassen können, sich global ausbreiten und andere Arten verdrängen. Besonders Baumbestände werden von einer globalen Erwärmung betroffen sein, da sie - durch Schadstoffe bereits geschwächt - aufgrund ihrer langen Lebensdauer eine sehr geringe "Ausbreitungsgeschwindigkeit" besitzen, d.h. sie können sich

noch schlechter an die veränderten Umweltbedingungen anpassen als andere Pflanzen. Die Taiga, d.h. der boreale Nadelwaldgürtel ist somit sehr gefährdet. Auch wenn diese die Möglichkeit hätte, den klimatischen Bedingungen entsprechend nach Norden zu "ziehen", könnte sie auf dem nun aufgetauten Permafrostboden der ehemaligen Tundra nicht mehr wachsen, da hier ausgedehnte Sumpfbereiche entstehen werden (nach Graß/Klingholz, 1990, S.178/180).

Durch die globale Erwärmung wird es auch zu einer Veränderung der Niederschlagsmuster auf der Erde kommen. Prinzipiell entsteht zwar durch die erhöhte Verdunstung mehr Niederschlag, dieser wird sich jedoch regional sehr unterschiedlich verteilen: Während in den tropischen Regenwaldgebieten der Niederschlag weiter zunehmen wird, ist beispielsweise für die Sahel-Zone in Afrika nach Klimamodellen eine weitere Niederschlagsverminderung und -variabilität anzunehmen, welche zu einer vermehrten Bodenerosion und damit zu Desertifikation in diesen schon jetzt von der Verwüstung bedrohten Gebieten der Erde führen wird. Wie sich die Niederschlagsverbreitung in der mittleren Breiten entwickeln wird, kann noch nicht genau vorhergesagt werden. Mit ziemlicher Sicherheit weiß man jedoch, daß die "Kornkammern" der Erde, d.h. der Mittlere Westen der USA und das Agrardreieck in den Staaten der ehemaligen Sowjetunion von einem starken Niederschlagsrückgang betroffen sein werden (Krause/Back/Koomey, 1992, S.46). Eine Verschiebung der Anbauflächen nach Norden ist aus Gründen der Bodenqualität (Versumpfung heutiger Dauerfrostböden) nur bedingt möglich. Auch die für die Photosynthese von Pflanzen auf den ersten Blick positiven Auswirkungen des Treibhauseffekts, nämlich erhöhte CO₂-Konzentration und höhere Temperatur werden diese Ertragseinbußen in der Landwirtschaft wohl kaum ausgleichen können. Eine weitere Folge des Treibhauseffekts und einer damit verbundenen globalen Erwärmung wird das vermehrte Auftreten tropischer Wirbelstürme sein. Durch die Erwärmung wächst der Bereich der Ozeane, in dem die Wassertemperatur die zur Bildung von Hurrikans und Taifunen nötigen 27° C übersteigt. Damit vergrößert sich nicht nur das Gebiet in denen diese Wirbelstürme entstehen, sondern auch ihre Intensität und Häufigkeit nimmt durch die verstärkte "Energiezufuhr" zu. Dies könnte dramatische Konsequenzen vor allem für die Karibischen Inseln, die Südküste der USA, aber auch für Ostasien haben.

2.2.3 Auswirkungen auf die Menschheit (Tertiäre Folgen)

Als dritte Unterteilung der Folgen einer globalen Erwärmung sollen nun schließlich noch die tertiären Auswirkungen betrachtet werden, d.h. Konsequenzen, die sich für die Menschheit ergeben. Es bietet sich an, hierbei zwischen gesundheitlichen Folgen für jeden Einzelnen und soziologischen Folgen, die die gesamte menschliche Gesellschaft betreffen, zu differenzieren. Die gesundheitlichen Auswirkungen, die direkt auf den Menschen wirken sind relativ klar erkennbar: Ein wärmeres Klima bringt vor allem im Sommer eine Zunahme der Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Durchblutungsstörungen und Atemwegserkrankungen wie Asthma mit sich (Leggett u.a., 1990, S. 212). Außerdem kann das menschliche Wärmeregulationssystem bei extrem hohen Temperaturen überlastet werden und damit zu Hitzschlag und einer Zunahme der sommerlichen Todesfälle führen. Allerdings wird sich eine globale Erwärmung überwiegend im Winter auswirken, weshalb diese Folgen eine eher untergeordnete Rolle spielen. Wesentlich wichtiger sind hierbei die indirekten Konsequenzen einer globalen Erwärmung für den Menschen: Durch die Veränderung der globalen Niederschlagsverteilung kann es zu einem - zumindest vorübergehenden - Sinken der weltweiten Nahrungsmittelproduktion kommen, da die großen Anbaugebiete der USA und Asiens mit einer Niederschlagsverminderung rechnen müssen. In Verbindung mit einem starken Bevölkerungswachstum vor allem in den Entwicklungsländern kann es hierbei zu Problemen kommen, die als gesellschaftlichen Folgen später erläutert werden sollen. Ebenfalls eine indirekte Gefahr für die Gesundheit des Menschen kann man in der durch die veränderte Niederschlagsverteilung verursachten, ungleichmäßigen oder sogar problematischen Wasserversorgung sehen. In schon heute von Wassermangel bedrohten Gebieten der Erde, zum Beispiel der Sahel-Zone in Afrika wird es zu vermehrten Schwierigkeiten bei der Wasserversorgung kommen. Eine weitere indirekte Gefahr für die Gesundheit des Menschen besteht in einer Ausbreitung der Überträger von Tropenkrankheiten. Durch die Erwärmung und die damit verbundene Expansion tropischer und subtropischer Gebiete können sich Krankheitsüberträger wie die Tse-Tse-Fliege weiter ausbreiten und große Gebiete durch Krankheiten wie Malaria in Gefahr bringen. Die wohl wichtigste indirekte Konsequenz einer globalen Erwärmung für die Gesundheit des Menschen ist die Gefahr von Überschwemmungen durch den Meeresspiegelanstieg. Diese bringen zwar auf den ersten Blick mehr wirtschaftliche als gesundheitliche Probleme, zum Beispiel Verlust an Ernte oder Zerstörung der Wohnstätte, aber durch Flucht aus den betroffenen Gebieten ergeben sich schwerwiegende Konsequenzen: Hungersnöte und das Ausbreiten von Seuchen sind nur zwei Folgen einer Unterbringung der Flüchtlinge in Sammellagern oder ähnlichen Einrichtungen, die mit Platzmangel zu kämpfen haben. Hier stoßen wir schon an die Grenzen der gesundheitlichen Folgen, denn Flüchtlinge bringen weitere Probleme mit sich, die im Folgenden als gesellschaftliche Auswirkungen einer globalen Erwärmung behandelt werden sollen.

Wie schon gesagt, werden zukünftige Klimaextreme wie Überflutung und Dürre viele "Umweltflüchtlinge" vor allem aus den Entwicklungsländern zur Folge haben. Deren Ziel werden natürlich die Industrieländer sein, da diese von Natur aus nicht so stark von einer globalen Erwärmung betroffen sein werden und außerdem mehr finanzielle Mittel zu ihrem Schutz besitzen. Europa und Nordamerika werden sich dann einer großen Zahl von Flüchtlingen gegenübersehen; folglich wird es hier vermehrt zu sozialen Spannungen und innerstaatlichen Konflikten kommen. Aber auch im globalen Rahmen wird sich das Risiko bewaffneter Konflikte erhöhen: Die aufgrund der weltweiten Klimaerwärmung verschlechterten Lebensbedingungen in den Entwicklungsländern werden den durch die

wirtschaftliche Vormachtstellung der Industrienationen ohnehin extremen Gegensatz dieser "zwei Welten", den sogenannten Nord-Süd-Konflikt, weiter verstärken. Daraus folgt eine größere Gefahr für bewaffnete Konflikte.

2.2.4 Positive und negative Rückkopplungseffekte

Zu den Folgen einer globalen Erwärmung gehört auch eine Betrachtung möglicher positiver oder negativer Rückkopplungseffekte. Das sind Prozesse zwischen Atmosphäre und Biosphäre, die eine Erwärmung entweder verstärken (positiv) oder abschwächen (negativ). Da es aufgrund der Komplexität des Klimasystems eine große Anzahl von Rückkopplungen gibt, sollen hier nur die wichtigsten und bekanntesten behandelt werden. Man unterscheidet zwischen geophysikalischen und bio-geochemischen Rückkopplungen. Zur ersten Gruppe gehört beispielsweise eine abnehmende Albedo der Erdoberfläche aufgrund der schrumpfenden Schnee- und Eisdecke, woraus eine erhöhte Absorption des Sonnenlichts und damit eine weitere Erwärmung resultiert. Ebenfalls Teil der geophysikalischen Rückkopplungen ist eine verstärkte Wolkenbildung aufgrund von erhöhter Verdunstung. Deren Folge ist nicht unbedingt eine Abschattung und damit Abkühlung der Erdoberfläche, sondern eine Erwärmung, da "Wolken in größeren Höhen [...] weniger Strahlung abgeben [...]" (Leggett u.a., 1991, S.57). Zu den bio-geochemischen Rückkopplungen zählt beispielsweise das Auftauen der Permafrostböden in höheren Breiten und der damit verbundenen Freisetzung des Treibhausgases Methan. Die bisher einzige bekannte negative Rückkopplung ist die Eutrophierung, d.h. die Stagnation des Wassers aufgrund von übermäßigem Algenwachstum. Die dadurch entstandene Biomasse kann CO₂ aufnehmen und so die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre senken. Abschließend läßt sich sagen, daß die Computermodelle, mit denen die Folgen einer globalen Erwärmung simuliert werden, keinesfalls fehlerfrei sind, da gerade Rückkopplungseffekte aufgrund der hohen Komplexität des Klimageschehens noch nicht berücksichtigt werden können. Doch sie sind bisher unsere einzige Möglichkeit, die potentiellen Gefahren einer Klimaerwärmung abzuschätzen.

2.3 Mögliche Maßnahmen und Gegenstrategien

Nachdem jetzt die Ursachen und Folgen einer globalen Klimaerwärmung genannt worden sind, sollen nun geeignete Maßnahmen beschrieben werden, mit denen man der Bedrohung durch den Treibhauseffekt begegnen kann. Dabei wird grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen möglichen Wegen unterschieden: Der eine Weg bedeutet die Einschränkung der Emissionen der Treibhausgase auch zu Lasten des Lebensstandards der Menschen. Der andere Weg - und das ist der, den die Menschheit wohl gehen muß, wenn nicht unverzüglich andere Maßnahmen eingeleitet werden - bedeutet eine Anpassung an die veränderten Lebensbedingungen und damit eine Art "Ingenieurslösung", also eine im Vertrauen auf die menschliche Intelligenz und Anpassungsfähigkeit beruhende Strategie. Doch dieser zweite Weg ist gefährlich, denn die Menschheit hat noch nie versucht, ein so komplexes System wie das Klima und damit die gesamte Erde zu kontrollieren.

2.3.1 Maßnahmen in der Vergangenheit

Obwohl Fourier schon 1827 auf die Möglichkeit einer globalen Klimaerwärmung aufmerksam gemacht hat und der schwedische Naturforscher Arrhenius schon um 1900 erste Klimaberechnungen anstellte, wurden auch viele weitere Warnungen erst in den letzten beiden Jahrzehnten ernstgenommen. Und erst seit ungefähr 10 Jahren beschäftigen sich Politiker wirklich ernsthaft auf internationaler Ebene mit der Einleitung von Vorsorgemaßnahmen. Es wurden zwar sehr viele Konferenzen vor allem des United Nations Environmental Program (UNEP) und der World Meteorological Organisation (WMO) abgehalten, jedoch beinhaltete kaum ein Abschlußbericht eine Verpflichtung für die Teilnehmerstaaten, Emissionen von Treibhausgasen einzuschränken. Einzig die 1994 in Kraft getretene Klimarahmenkonvention verpflichtet die Industrieländer und die meisten Staaten Osteuropas dazu, ihre Treibhausgas-Emissionen bis zum Jahr 2000 auf das Niveau von 1990 zurückzuführen, wobei diese hochgesteckten Reduktionsziele schon nicht mehr zu erreichen sind und von den meisten Beteiligten nicht einmal Versuche dazu unternommen wurden. Die wohl wichtigsten Treffen waren die Konferenz von Montreal mit dem Montrealer Protokoll von 1987, die Konferenz von Toronto 1988, der Weltklimagipfel von Rio de Janeiro von 1990 und schließlich der Weltklimagipfel in Berlin im März 1995. Seit seiner ersten Konferenz im Jahre 1988 spielt auch der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) eine immer wichtigere Rolle, da er in regelmäßigen Zeitabständen Publikationen zu den neuesten Informationen und Entwicklungen im Bereich der Klimaforschung herausgibt. Doch wie schon gesagt, hatten die meisten dieser Bemühungen nur einen beratenden Charakter für die Regierungen der einzelnen Ländern, ohne diese wirklich dazu zu verpflichten, Maßnahmen gegen eine globale Erwärmung zu ergreifen.

2.3.2 Reduktionsmöglichkeiten für die einzelnen Treibhausgase

Hier sollen nun Möglichkeiten besprochen werden, um die Emissionen der einzelnen Treibhausgase und damit ihre Konzentration in der Atmosphäre zu verringern. Wie schon gesagt entsteht das weitaus wichtigste Treibhausgas, das Kohlendioxid, vor allem durch das Verbrennen fossiler Energieträger. Und genau hier müssen die Maßnahmen zur Verringerung der CO₂-Konzentration ansetzen: Der Energieverbrauch der Menschen muß verringert werden. Dies läßt sich vor allem durch eine rationelle Energienutzung und den Gebrauch von erneuerbaren Energieträgern durchführen. Ohne ihren heutigen Lebensstandard zu verlieren, ist es für die Bewohner der Industrieländer möglich, die Kohlendioxid-Emissionen durch eine effektive Energienutzung um die Hälfte zu reduzieren (Rabe, 1990, S.80). Kurzfristige Möglichkeiten zur Verringerung des Energieverbrauchs sind vor allem im Verkehrsbereich zu finden. In einer Verlagerung des Individualverkehrs mit dem Auto auf die öffentlichen Verkehrsmittel und auch in der so heftig umstrittenen, spürbaren Erhöhung des Benzinpreises durch steuerliche Maßnahmen besteht auf jeden Fall eine kurzfristig einsetzbare Möglichkeit zur Verringerung des Energieverbrauchs. Wichtig ist hierbei, daß dies auf breiter

Ebene geschieht und nicht nur in einigen Ballungszentren. Deshalb ist es unerlässlich, den Einzugsbereich öffentlicher Verkehrsmittel auszuweiten und die Attraktivität anderer Verkehrsmittel wie zum Beispiel dem Fahrrad zu erhöhen. Kurzfristig bietet sich ebenfalls die Maßnahme an, Filter in Industriebetrieben und Katalysatoren in Autos einzusetzen, allerdings können diese Möglichkeiten zumindest in Deutschland wohl größtenteils als ausgeschöpft gelten. Mittelfristig sind wohl die effektivsten Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs möglich: Der wohl wichtigste Punkt ist hierbei die Wärmedämmung, da das Heizen mit 75 % (Borsch/Wiedemann, 1992, S.106) des Gesamtenergiebedarfs den größten Teil der benötigten Energie in Privathaushalten darstellt. Außer einer rationellen Energienutzung, d.h. einer möglichst effektiven Anwendung der vorhandenen Energieträger, ist es mittelfristig auch sinnvoll, von fossilen auf regenerative Energieträger umzusteigen. Dazu gehören unter anderem die Wasserkraft, die Solarenergie, die Windenergie und Erdwärme. Das Potential zur Nutzung von Wasserkraft muß unter ökologischen Gesichtspunkten in Deutschland schon als ausgeschöpft angesehen werden. Die Solarenergie, bei der man zwischen der Wärmegewinnung durch Kollektoren und der direkten Stromerzeugung durch photovoltaische Zellen unterscheidet, bietet jedoch noch große Einsatzmöglichkeiten. Die Windenergie ist in Deutschland nur auf ungefähr 10 % der Fläche (Schönwiese/Diekmann, 1987, S.195) wirtschaftlich nutzbar. Im Gegensatz dazu läßt sich die Erdwärme in größerem Maßstab nutzen und ist deshalb zur zukünftigen Anwendung sicher nicht uninteressant. Global betrachtet gibt es für die einzelnen regenerativen Energieträger auf jeden Fall noch erweiterte Einsatzmöglichkeiten, zum Beispiel die Wüste zur Gewinnung von Solarenergie oder Gebiete mit beständigem starken Wind (Passate) zur Nutzung von Windenergie. Die erneuerbaren Energieträger müssen auf jeden Fall immer stärker eingesetzt werden und die fossilen Energieträger ablösen, wenn der besprochene "erste Weg" gegangen werden soll.

Für das zweite wichtige Treibhausgas, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe gibt es - da diese ausschließlich vom Menschen erzeugt werden - nur eine Möglichkeit der Konzentrationsverringering: Vermeidung der Herstellung der FCKW. Dies könnte ohne große Schwierigkeiten im Bereich der Kühlsysteme, der Aufschäumung und der Reinigung durchgeführt werden, da hier bereits adäquate Stoffe existieren. Das Problem besteht in der Industrie, die diesen gerade in Deutschland wichtigen Wirtschaftszweig nicht verlieren möchte. Doch Zögern kann hier sehr verhängnisvoll sein, da die FCKW - auch im Hinblick auf die Zerstörung der Ozonschicht - einige Jahrzehnte brauchen, um die obere Atmosphäre zu erreichen und ungefähr 100 Jahre existieren. Das bedeutet, daß ein sofortiger Produktionsstopp erst in einigen Jahrzehnten erkennbar werden würde.

Die atmosphärische Konzentration des Treibhausgases Methan läßt sich auch - zumindest in sämtlichen vom Menschen regulierten Bereichen - beträchtlich reduzieren. Zum Beispiel kann man Reissorten züchten, die weniger Methan entstehen lassen und die gleichzeitig produktiver sind, sogenannte Hybrid-Reissorten. Eine weitere sehr effektive Möglichkeit zur Methan-Verringerung besteht in der Verkleinerung der Rinderherden, vor allem in den Entwicklungsländern, in denen zwar sehr viele Methan-produzierende Rinder existieren, die jedoch nur eine geringe Produktivität besitzen. Hier kann man auch durch spezielle methanhemmende Futtermittel eine Verringerung erreichen. Doch da diese Quellen hauptsächlich in den Entwicklungsländern eine Rolle spielen, ist es sehr schwierig, hier effektive Maßnahmen durchzuführen. Bauern, die schon jetzt am Existenzminimum leben, haben kein Interesse daran, ihre Herde zugunsten der Atmosphäre zu verkleinern. Allerdings würde eine Verringerung des Fleischkonsums in den Industrieländern ebenfalls eine Verkleinerung der Rinderherden nach sich ziehen.

Auch das letzte wichtige Treibhausgas, das Distickstoffoxid, entsteht hauptsächlich im landwirtschaftlichen Bereich, so daß sich die Emissionen hier leicht verringern lassen. Die wichtigste Quelle besteht in der Verwendung von künstlichen Düngemitteln. Diese könnten durch Ausweichen auf natürlichen Dünger vermieden werden. Im Bereich der Landwirtschaft würde sich somit eine Umstellung auf eine ökologisch verträgliche Betriebsform langfristig lohnen. Aber auch hier gilt, daß die Umstellung der Landwirtschaft in den Entwicklungsländern Probleme bereiten wird, da die Bauern keine Möglichkeit haben, ihre Bewirtschaftungsform so schnell umzustellen. Dagegen wird die Landwirtschaft in den Industrieländern dies aufgrund der Befürchtung von Ertragseinbußen wohl auch nicht in größerem Rahmen durchführen werden.

2.3.3 Maßnahmen auf längere Sicht

Neben diesen allgemeinen Möglichkeiten zur Verringerung der Emissionen der Treibhausgase gibt es auch Maßnahmen, die nur in einem langfristigen Rahmen durchgeführt werden können. Dazu gehört eine verstärkte und effektivere Entwicklungshilfe von Seiten der Industrieländer sowie eine Eindämmung der Waldrodung mit zusätzlicher Wiederaufforstung der tropischen Regenwälder. Obwohl sich diese Maßnahmen überwiegend auf die Kohlendioxid-Emissionen auswirken, spielen sie auch für die anderen Treibhausgase eine Rolle. Schließlich soll dann noch erörtert werden, weshalb der Ausbau der Kernenergie nicht zu den geeigneten Maßnahmen gehört. Die auf lange Sicht wohl vielversprechendste Strategie, die Treibhausgas-Emissionen einzudämmen, ist eine verbesserte Entwicklungshilfe für die heutigen Entwicklungsländer. Diese Hilfe sollte nicht oder kaum aus Nahrungsmittelhilfe bestehen, da hierdurch nur die Auswirkungen nicht aber die Ursachen der Probleme dieser Länder bekämpft werden. Vielmehr sollte diese Entwicklungshilfe allgemein als "Hilfe zur Selbsthilfe" betrachtet werden. Es sollten den Entwicklungsländern also Möglichkeiten gegeben werden, ohne ausländische Hilfe zu überleben. Der Bezug auf die Eindämmung der Treibhausgase mag zwar hier nicht sofort einleuchten, da die Entwicklungsländer momentan sehr wenig zum anthropogenen Treibhauseffekt beitragen; es ist jedoch sehr wahrscheinlich, daß viele der heutigen Entwicklungsländer in Zukunft den Weg zu wirtschaftlich erfolgreicherem Schwellenländern beschreiten werden. Und genau hierbei wird die Umwelt am meisten geschädigt und eben auch

Unmengen an Treibhausgasen emittiert, wie man am Beispiel der Ostblockländer oder China sehen kann: Hier wurde die Industrialisierung zum größten Teil auf Basis der Schwerindustrie und der Kohle- und Ölvorräte erreicht, was durch einen extrem schlechten Wirkungsgrad der verbrauchten fossilen Energieträger zu einem starken Ausstoß von Treibhausgasen geführt hat. Die Strategie einer verbesserten Entwicklungshilfe beruht nun darauf, durch Transfer modernster Technologie in die Entwicklungsländer die umweltverschmutzende Phase der Industrialisierung hier zu "überspringen". Damit wird den Bewohnern dieser Länder also eine Möglichkeit gegeben, ihren Lebensstandard zu erhöhen, ohne so stark Treibhausgase zu produzieren, wie es in den Industrieländern der Fall ist und somit von Anfang an eine umweltschonende Technik einzusetzen. Wenn dies erst einmal erreicht ist, bieten sich für viele der heutigen Entwicklungsländer auch weitere Möglichkeiten zur Verringerung der Treibhausgas-Konzentrationen: Beispielsweise kann in der Sahara durch Ausnutzung der Solarenergie der Verbrauch fossiler Energieträger weiter gesenkt und damit auch die Abhängigkeit vom Ausland verringert werden. Eine weitere Maßnahme zur Verringerung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre besteht in der Eindämmung der Waldrodung mit gleichzeitiger Wiederaufforstung der tropischen Regenwälder. Wie schon gesagt ist die Rodung der Wälder aufgrund des in den Bäumen enthaltenen Kohlenstoffs eine beträchtliche Quelle für das wichtige Treibhausgas Kohlendioxid. Durch eine Beendigung der starken Waldrodung in Entwicklungsländern wie beispielsweise Brasilien, Zaire oder Indonesien kann somit auf ganz natürliche Weise die Kohlendioxid-Emission gesenkt werden. Doch in diesen Ländern ist die Waldrodung für viele Menschen die Lebensgrundlage. Somit kann dieser Situation nur durch die schon genannte verbesserte Entwicklungshilfe begegnet werden. Wenn die Waldrodung dann eingedämmt ist, besteht die weitere Möglichkeit, durch Aufforsten von Wäldern, also durch das Erzeugen neuer, Kohlendioxid-absorbierender Biomasse - nicht nur in tropischen Regionen, sondern auch in mittleren Breiten - das in anderen Bereichen emittierte Kohlendioxid zumindest teilweise zu kompensieren, und damit das Ausmaß und die Folgen einer globalen Erwärmung zu verringern. Diese Aufforstung stellt also eine Art "Überbrückungsmaßnahme" dar, mit der die Abhängigkeit von den fossilen Energieträgern solange ausgeglichen werden kann, bis sie überwunden ist und eine sinnvolle Nutzung der regenerativen Energieträger erreicht ist. Und dabei ist eine solche Maßnahme durchaus realistisch: Nach N. Myers würde schon eine Aufforstung auf einer Fläche von einer Million Quadratkilometern ausreichen, um die Kohlendioxid-Emissionen für mindestens 30 Jahre zu kompensieren (Leggett u.a., 1990, S.446). Die Gesamtkosten beliefen sich demnach bei einem angenommenen Durchschnittspreis von 400 Dollar pro Hektar auf ca. 40 Milliarden Dollar - ein im Hinblick auf den Nutzeffekt relativ niedriger Preis. Dabei müßten unbedingt die Industriestaaten den größten Teil der Kosten tragen - allein schon weil sie die Hauptverursacher des Treibhauseffektes waren und immer noch sind.

Die vermehrte Nutzung der Kernenergie wird häufig als Methode genannt, auf den Gebrauch von fossilen Energieträgern zu verzichten, aber trotzdem noch genügend Energie zur Verfügung zu haben. Denn der Vorteil der Kernenergie liegt in den auf den ersten Blick fehlenden Emissionen von Treibhausgasen. Doch zahlreiche Gründe sprechen gegen diese Strategie: Erstens ist hier natürlich die extrem hohe wirtschaftliche Belastung zu nennen, die ein Ausbau der Kernenergie zur Folge haben würde. Denn unter der Annahme, daß der Energieverbrauch weiter so wächst wie bisher müßte "von heute an bis zum Jahr 2025 im Durchschnitt alle zweieinhalb Tage ein neues Atomkraftwerk [...] errichtet werden" (Leggett u.a., 1990, S.390), um allein den heutigen Verbrauch von Kohle zu ersetzen. Dies wäre gerade für die Entwicklungsländer eine wirtschaftlich absolut unrealisierbare Maßnahme. Ein zweiter Grund der gegen diese "nukleare Strategie" spricht ist das Problem der Entsorgung von Atommüll. Angesichts dessen, daß schon heute große Schwierigkeiten bestehen, das ausgebrannte Brennmaterial zu lagern, wird diese Strategie ohne eine verbesserte Entsorgung nicht möglich sein. Und drittens ist natürlich die Gefahr eines Unfalls in einem Atomkraftwerk mit seinen schwerwiegenden Konsequenzen immer gegeben.

C. Aussichten für die Zukunft

Nach Betrachtung der Ursachen, Auswirkungen und Maßnahmen in Bezug auf die globale Erwärmung durch den Treibhauseffekt läßt sich sagen, daß ein ungehinderter Anstieg der Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre auf jeden Fall erhebliche Gefahren für die Menschheit birgt. Doch unter diesen negativen Konsequenzen werden aller Voraussicht nach am meisten die Entwicklungsländer zu leiden haben, obwohl gerade sie bisher am allerwenigsten zu anthropogenen Treibhauseffekt beigetragen haben. Doch es ist immer noch möglich, die negativen Folgen einer globalen Erwärmung zu vermindern - auch wenn der Treibhauseffekt nicht mehr ganz aufzuhalten ist. Durch rationellen Energieverbrauch, durch Nutzung regenerativer Energieträger und durch Produktionsverbot sämtlicher FCKW ist zumindest eine Wachstumsverringerung der atmosphärischen Treibhausgase möglich. Und je schneller dies geschieht, desto geringer werden Ausmaß der globalen Erwärmung und deren Konsequenzen sein. Doch dazu ist immenser politischer Handlungsbedarf notwendig. Und solange einerseits nicht jeder einzelne Mensch bereit ist, mit einfachen Mitteln dazu beizutragen, eine globale Erwärmung zu verhindern und andererseits die Politiker eher darauf aus sind, ihre Macht zu festigen, als auf den ersten Blick vielleicht "unangenehme" Maßnahmen zur Rettung der Zukunft unserer Erde zu ergreifen - solange werden wir mit der Vorstellung konfrontiert werden, eines Tages doch noch auf einer Welt der in Zeitungen so oft genannten "apokalyptischen Klimakatastrophe" leben zu müssen.

Literaturangabe

I. Bücher

1. J. Leggett/S.H. Schneider/D. Schimel/M. Kelly/G.M. Woodwell/B. Huntley/A. Haines/J. Goldemberg/A. Lovins/C. LaPorta/M. Walsh/B. Keepin/N. Myers/A. Ehrlich/K. Ramakrishna/S. George/, "**GLOBAL WARMING - Der Greenpeace Report**" Piper Verlag, München 1991
2. Wilfried Bach, "**Klimaschutz**", Verlag Müller, Karlsruhe, 1991
3. K. Blanck/D. Matzen/P. Schott/J. Wiegand, "**Klima Aktionsbuch - Was tun gegen Ozonloch und Treibhauseffekt?**", Verlag Die Werkstatt, Göttingen, 1990
4. Christian-Dietrich Schönwiese, "**Klima im Wandel**", Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart, 1992
5. John Firor, "**Weltklima**", Spektrum - Akademischer Verlag, 1993
6. Hartmut Graßl / Reiner Klingholz, "**Wir Klimamacher**", Verlag S. Fischer, Frankfurt am Main, 1990
7. P. Borsch / P.M. Wiedemann, "**Was wird aus unserem Klima ? - Fakten, Analysen & Perspektiven**", Verlag Bonn aktuell, München 1992
8. Fred Pearce, "**Treibhaus Erde - Die Gefahren der weltweiten Klimaveränderungen**", Georg Westermann Verlag GmbH, Braunschweig, 1990
9. Florentin Krause / Wilfried Bach / Jon Koomey, "**Energiapolitik im Treibhauszeitalter - Maßnahmen zur Eindämmung der globalen Erwärmung**", Verlag C.F. Müller GmbH (Economica Verlag GmbH), Karlsruhe / Bonn 1992
10. Peter Frankenberg, "**Moderne Klimakunde - Grundwissen von Advektion bis Treibhausklima**", Westermann Schulbuch Verlag GmbH, Braunschweig, 1991
11. Ernst Heyer, "**Witterung und Klima**", BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1972, Überarbeitete Auflage 1986
12. Klaus Hasselmann, Wolfgang Sell, Wolfgang Blum, Dieter Thierbach, "**Deutsches Klimarechenzentrum**", Herausgegeben von Deutsches Klimarechenzentrum GmbH, Hamburg, 1994
13. Harald Gaber, Bruno Natsch, "**Gute Argumente: Klima**", C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München, 1989
14. Heinz Haber, "**Eiskeller oder Treibhaus - So zerstören wir unser Klima**", Verlag Ullstein GmbH, Berlin, 1992
15. Gerd R. Weber, "**Treibhauseffekt - Klimakatastrophe oder Medienpsychose**", Dr. Böttiger Verlags-GmbH, Wiesbaden, 1991
16. Klaus Gerosa, "**Klimaschock**", Verlag Arthur Moewig GmbH, Raststatt, 1987
17. Dagny Kerner / Imre Kerner, "**Der Klimareport**", Verlag Kiepenheuer & Witsch, Köln, 1990
18. Jonathan Weiner, "**Die nächsten 100 Jahre - Wie der Treibhauseffekt unser Leben verändern wird**", C. Bertelsmann Verlag GmbH, München, 1990
19. Werner Rabe, "**Die Erde im Fieber - Die Folgen von Ozonloch und Treibhauseffekt**", Lamuv Verlag GmbH, Göttingen, 1990
20. C.-D. Schönwiese / Bernd Diekmann, "**Der Treibhauseffekt - Der Mensch ändert das Klima**", Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart, 1987
21. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Genf, 1992:
Update of:

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "**Scientific Assessment of Climate Change, Report of Working Group 1, and accompanying Policymakers' Summary**", Geneva, August 1990

22. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "**Formulation of Response Strategies, Report of Working Group 3**", Geneva, 1990

II. Zeitschriften/Zeitungen

1. Mrasek V., "**Eindeutige Schuldzuweisung der Klimaforscher**", in: Süddeutsche Zeitung vom 7. Dezember 1995, Teil Umwelt/Wissenschaft/Technik S. 3
2. Schütze C., "**Letzte Gewißheit bringt erst die Katastrophe**", in: Süddeutsche Zeitung vom 24. März 1995, S. 12
3. Lausch E., "**Heinrichs eisige Rätsel**", in: DIE ZEIT vom 17. März 1995, S. 50
4. Andreas R., "**Steinewerfen im Glashaus**", in: SZ Technik - Beilage der Süddeutschen Zeitung vom 27. März 1995
5. Vorholz F., "**Lebenslänglich im Treibhaus**", in: DIE ZEIT vom 24. März 1995
6. Autor unbek., "**UNO: Klima verändert sich drastisch**", in: Süddeutsche Zeitung vom 8. März 1995
7. Hasselmann K., "**Klimaänderung mit einer geschätzten Wahrscheinlichkeit von 95% nachgewiesen**", in: Pressemitteilung des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) vom 23. Februar 1995
8. Autor unbek., "**Palmen auf Helgoland**", in: Der Spiegel vom 20. März 1995

III. Sonstige Medien

Im World Wide Web des Internet:

1. **Deutsches Klimarechenzentrum** (<http://www.dkrz.de/>)
2. **National Climate Data Center** (<http://www.ncdc.noaa.gov/>)
3. Magazin des Climate Action Network: **ECO** (<http://www.igc.apc.org/climate/eco.html>)
4. Die **Climate Change Fact Sheets** (<http://www.unep.ch/iucc/fs-index.html>)
5. HDP-**Intergovernmental Panel on Climate Change** (<http://www.ciesin.org/HP/ipcc.html>)
6. Das **Global Change Master Directory** (<http://gcmd.gsfc.nasa.gov/gcmdhome.html#GCMD>)

7. **Greenpeace International** (<http://www.greenpeace.org/>)

In den Newsgroups des Usenet:

1. sci.geo.meteorology
2. sci.environment
3. cl.klima.allgemein
4. cl.klima.international
5. cl.klima.diskussion

© 19. Januar 1997 [Philipp Schneider](#)