

Beeinflussung des globalen Klimas durch den Menschen: Historische Entwicklung und Stand des Wissens zum anthropogenen Treibhauseffekt

Gerhard Sardemann

Vollständige bibliographische Angaben

Sardemann, Gerhard:

Beeinflussung des globalen Klimas durch den Menschen: Historische Entwicklung und Stand des Wissens zum anthropogenen Treibhauseffekt. In: Kopfmüller, J.; Coenen, R. (Hrsg.): Risiko Klima. Der Treibhauseffekt als Herausforderung für Wissenschaft und Politik. Frankfurt u. a.: Campus 1997, S. 27-73
(Veröffentlichungen des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Bd.4)

Hinweis zur vorliegenden Kopie

Für die vorliegende elektronische Kopie wurde das Original eingescannt und mit OCR-Software (Optical Character Recognition) bearbeitet. Das angezeigte Seitenabbild entspricht unter Berücksichtigung der Qualitätseinbußen beim Scannen dem Buchlayout. Durch die OCR-Software wurde zusätzlich die Durchsuchbarkeit des Textes ermöglicht. Auf Grund einer gewissen Fehleranfälligkeit des Verfahrens kann keine Garantie gegeben werden, dass der so erzeugte Text hundert Prozent mit dem Originaltext identisch ist. Mit Fehlern muss gerechnet werden. Eine intellektuelle Kontrolle des OCR-Ergebnisses hat nicht stattgefunden. Wird Text aus dem Dokument kopiert, basiert der exportierte Text auf dem OCR-Ergebnis und kann deshalb ebenfalls Fehler enthalten.

Beeinflussung des globalen Klimas durch den Menschen: Historische Entwicklung und Stand des Wissens zum anthropogenen Treibhauseffekt

Gerhard Sardemann

Gliederung

1. Geschichte der Treibhausdiskussion
 - 1.1 Anfänge der Behandlung der CO₂-Problematik in der Wissenschaft
 - 1.2 Die Entwicklung eines internationalen öffentlichen Interesses an der Klimaproblematik
 - 1.3 Von der ersten Weltklimakonferenz bis zum ersten Assessment Report des IPCC
2. Prognosen des Klimas
 - 2.1 Historische Entwicklung von Klimamodellen: Einfache Klimamodelle
 - 2.2 Globale Zirkulationsmodelle
 - 2.3 Aktueller Stand der Modellrechnungen
3. Stand des Wissens zum anthropogenen Treibhauseffekt: Der 2. Assessment Report des IPCC
 - 3.1 Das Klimasystem
 - 3.2 Klimafolgen
 - 3.3 Die ökonomische und soziale Dimension
4. Probleme naturwissenschaftlicher Klima- bzw. Klimawirkungsforschung

Literatur

1. Geschichte der Treibhausdiskussion

Seit der Mensch im großen Maßstab fossile Brennstoffe zum Heizen oder in der industriellen Produktion einsetzt, wird die Frage diskutiert, inwieweit die dabei entstehenden Emissionen schädliche Auswirkungen haben können. Während man die Wirkungen von Schwefeldioxid oder schwefliger Säure wegen der offensichtlichen Schäden, die sie bei Pflanzen und im besonderen bei Bäumen verursachen, relativ früh untersuchte und auch Abhilfemaßnahmen einleitete, fand die Wirkung des ebenfalls in großen Mengen emittierten Kohlendioxids eher akademisches Interesse, wurde aber durchaus im Zusammenhang mit der Kohlendioxidtheorie des Klimas diskutiert. Man suchte nach Gründen für die Entstehung von Eiszeiten und fand diese in erdgeschichtlichen Schwankungen des CO₂-Gehaltes. Die Beschäftigung mit der Klimageschichte lenkte die Aufmerksamkeit auf die Variabilität des Klimas, ihre Ursachen und die Auswirkungen vergangener und möglicher zukünftiger Klimaschwankungen auf den Menschen.

1.1 Anfänge der Behandlung der CO₂-Problematik in der Wissenschaft

Schon 1824 vergleicht Fourier die Atmosphäre mit dem Glasdeckel eines sich durch die Sonneneinstrahlung aufheizenden Gefäßes, ähnlich den Verhältnissen in einem Treibhaus. 1861 bemerkt Tyndall aufgrund von Messungen der Absorption infraroter Strahlung durch Wasserdampf und CO₂, daß nur die genannten Bestandteile der Atmosphäre für den Treibhauseffekt verantwortlich sind, wobei er dem Wasserdampf die wesentliche Bedeutung im Einfluß auf den Strahlungshaushalt zubilligt. Allerdings führt auch er schon Änderungen der Klimamitteltemperaturen auf Schwankungen der CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre zurück (nach Plass 1959).

Ende des 19. Jahrhunderts wird man sich allgemein bewußt, daß der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre aufgrund der großräumigen Verbrennung von Kohle zunehmen könne. Allerdings betont beispielsweise C. Winkler in seinem 1883 vor dem 2. Allgemeinen Deutschen Bergmannstag in Dresden gehaltenen Vortrag, daß der Zuwachs des mittleren Kohlendioxidgehalts durch die jährlich ver-

brannte Kohlemenge unmeßbar klein sei und nach menschlichen Begriffen riesige Kohlenstoffmengen quasi »spurlos im Luftmeer verschwinden« (Winkler 1883). Dennoch kommt in den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts dem CO₂-Gehalt in der Atmosphäre die größte Bedeutung bei der Erklärung von Klimaschwankungen zumindest im geologischen Maßstab zu. Arrhenius veröffentlicht 1896 eine erste quantitative Theorie, die Klimaschwankungen (insbesondere den Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten) mit Änderungen des CO₂-Gehaltes zu erklären versucht. Eine Verdopplung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre führt nach den Abschätzungen von Arrhenius zu einer Temperatursteigerung zwischen 5 und 6 °C, mit höheren Werten in hohen Breitengraden. Bei seinen Berechnungen berücksichtigt Arrhenius, daß eine Erhöhung der mittleren Temperatur zu einer Erhöhung der Luftfeuchte und durch die zusätzliche Strahlungsabsorption zu einer weiteren Temperaturerhöhung führen muß. Dieser Zusammenhang wird 1899 auch von Chamberlin beschrieben. Der heutzutage immer wieder dafür verwendete Begriff der »positiven Rückkopplung« war zur damaligen Zeit allerdings noch nicht geprägt.

In Arbeiten der Jahre 1903 und 1908 weist Arrhenius darauf hin, daß die Verbrennung von Kohle (zu seinen Zeiten etwa eine Gigatonne pro Jahr bei stark steigender Tendenz) den CO₂-Gehalt der Atmosphäre erhöhen dürfte, allerdings die Ozeane in der Lage seien, einen Großteil der vom Menschen verursachten Einträge in die Atmosphäre aufzunehmen. Eine mögliche Erwärmung der Erde durch einen CO₂-Anstieg wird als positiv angesehen. So ist es für Arrhenius »beruhigend zu wissen, daß die Gletscher in allerjüngster Zeit etwas im Zurückschreiten begriffen sind, was vielleicht auf der stetig wachsenden Kohleverbrennung beruht« (Arrhenius 1903, S. 570). Aufgrund der Arbeiten von Arrhenius, aber auch von Chamberlin, der in einer ganzen Serie von Aufsätzen die geologischen Konsequenzen der Kohlendioxidtheorie beschreibt, war diese Theorie damals eine allgemein anerkannte Erklärung für Klimaschwankungen.

Dies änderte sich, nachdem Milankovic Klimaschwankungen durch Änderungen der Sonneneinstrahlung aufgrund von Variationen der Erdbahnparameter erklärte (Milankovic 1930). Auch büßte die Kohlendioxidtheorie viel von ihrer Überzeugungskraft ein, als klar wurde, daß sich die Absorptionsbanden von Wasserdampf und CO₂ überschneiden. In einem ähnlichen Zusammen-

hang wies z.B. Süßenberger in Deutschland darauf hin, daß die Absorptionsbanden von CO_2 zwar eine 100prozentige Schwächung des betreffenden Frequenzbereiches bewirken könnten, die Banden jedoch extrem schmal und daher in ihrer Wirksamkeit im Vergleich zur Absorption langwelliger Strahlung durch den Wasserdampf äußerst gering seien (Süßenberger 1943).

Aus heutiger Sicht sehr interessant ist die Reaktion der zeitgenössischen Wissenschaft auf den stetigen bis etwa 1940 anhaltenden Temperaturanstieg Anfang dieses Jahrhunderts. Auf Trends in der damaligen Größenordnung wird heute äußerst sensibel reagiert, das Interesse damals war vergleichsweise gering. Dies mag zum einen an dem im Vergleich zu heute langsamen Zugriff auf überregionale Beobachtungsdaten gelegen haben und an den Schwierigkeiten, große Datenmengen per Hand auszuwerten. So wurde man auf die Umkehrung des Trends und damit Abkühlungstendenz seit 1940 auch erst in den 1960er Jahren aufmerksam. Ein anderer Grund lag sicherlich in der Gewichtung des Klimaproblems, falls es überhaupt als Problem angesehen wurde, im Vergleich zu anderen, vor allem ökonomischen, Problemen der damaligen Zeit.

Von Scherhag wurde der damalige Erwärmungstrend, den er vor allem in den Polarregionen beobachtete, auf periodische Klimaschwankungen zurückgeführt (Scherhag 1939). In einer heute noch viel zitierten Arbeit erklärte Callendar 1938 den Temperaturanstieg durch eine Zunahme der CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre. Nach CO_2 -Messungen zur Jahrhundertwende in England und 1936 in den USA hatte die CO_2 -Konzentration um 6% zugenommen, was theoretischen Abschätzungen Callendars entsprach. In derselben Arbeit wertete Callendar die Temperaturmeßreihen von 140 Stationen aus und ermittelte einen Temperaturanstieg von $0,6^\circ\text{C}$ seit dem Jahr 1875. Dieser Temperaturanstieg wurde von ihm unter anderem auf den Einfluß anthropogener CO_2 -Einträge zurückgeführt. Er machte Abschätzungen zum Einfluß einer Verdoppelung der CO_2 -Konzentration auf die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche und prognostizierte für diesen Fall eine Erwärmung der Atmosphäre um $1,6^\circ\text{C}$ (Callendar 1938).

Erst 1956 nahm Plass die Diskussion über die Kohlendioxidtheorie des Klimas wieder auf. Nach Plass wirkt sich die gleichzeitige Absorption infraroter Strahlung durch Wasserdampf und Kohlendioxid nur relativ wenig auf Änderungen des atmosphäri-

schen Strahlungshaushaltes durch eine Erhöhung der CO₂-Konzentrationen aus, was unter anderem von ihm damit begründet wird, daß die Absorptionslinien beider Bestandteile unterschiedlich auf der Frequenzskala verteilt sind. Hier sei vor allem die Genauigkeit der Rechnungen gefragt, unter Berücksichtigung experimenteller Daten zu den spektralen Eigenschaften von Kohlendioxid und Wasserdampf. Zur Ausführung der Rechnungen wird ausdrücklich auf die Verwendung eines »MIDAC high speed computer« hingewiesen (Plass 1956).

Die von Plass berechnete relativ große Temperaturerhöhung von 3,6°C bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration wurde 1960 in einem Aufsatz von Kaplan in Zweifel gezogen. Dieser berücksichtigt in seinen Rechnungen den Einfluß von Wolken auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und kommt bei mittleren Bewölkungsbedingungen auf Temperaturänderungen die um einen Faktor 2 bis 3 niedriger sind als die von Plass berechneten. Weitergeführt wurde die Diskussion 1963 in einem Aufsatz von Möller, der ebenso wie Kaplan anzweifelt, daß sich die Kohlendioxidtheorie zur Erklärung vergangener Klimaschwankungen eignet.

Auch Callendar zögerte nach einer erneuten Auswertung der Jahresmitteltemperaturen von diesmal über 400 Stationen, einen signifikanten Temperaturanstieg in nördlichen Breiten mit Hilfe eines Anstiegs der CO₂-Konzentrationen zu erklären. Er stellte jedoch fest, daß die beobachteten Temperaturtrends »nicht unkompatibel zur CO₂-Hypothese« sind (Callendar 1961). Ein Grund für dieses Zögern, obwohl Callendar seine 1938 aufgestellte Theorie durch die Rechnungen von Plass bestätigt sah, könnte in den kritischen Anmerkungen anderer Autoren über die Entwicklung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre liegen und deren Einschätzung, daß andere Faktoren (insbesondere der atmosphärische Aerosol- und Staubgehalt) bestimmend auf das Klima einwirken. In der Anfangszeit der Diskussionen über die Beeinflussung des Klimas durch Änderungen des CO₂-Gehaltes wurde zudem häufig bestritten, daß sich die CO₂-Konzentrationen meßbar erhöht hätten. Messungen der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre wurden allerdings auch nur sehr vereinzelt und sporadisch durchgeführt. Erst 1957, im internationalen geophysikalischen Jahr, wurde von Keeling mit regelmäßigen Messungen auf dem Mauna Loa in Hawaii und am Südpol begonnen. Diese Meßreihen werden auch heute

noch weitergeführt und zeigen sehr anschaulich den stetigen Konzentrationsanstieg des CO₂.

1.2 Die Entwicklung eines internationalen öffentlichen Interesses an der Klimaproblematik

Die bisherigen Ausführungen dürften deutlich gemacht haben, daß man sich bis etwa 1960 nur vereinzelt mit der Problematik wachsender CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre beschäftigt hatte und auch beobachtete Klimavariationen nie als globale Bedrohung oder gar als ein Menschheitsproblem ansah. In den 1960er Jahren begann man jedoch nach dem Start der ersten Satelliten und bemannten Raumkapseln, den Planeten mit anderen Augen zu betrachten. Man wurde sich der Gefahren eines unbegrenzten Wachstums der Weltbevölkerung (»Bevölkerungsbombe«) bewußt, und es wurden Fragen der Begrenztheit der Ressourcen, Schwierigkeiten einer zukünftigen Energieversorgung und Probleme globaler Umweltveränderungen thematisiert. Auch das Interesse an der Problematik eines anthropogen veränderten Klimas wuchs kräftig. Anders als zuvor die Fachwissenschaftler, deren Wirkungsradius sich auf ein interessiertes Fachpublikum, Leser von Fachzeitschriften oder Teilnehmer von Fachkongressen beschränkte, traten nun Wissenschaftler an die Öffentlichkeit, die sich nicht mehr auf ihr Fachgebiet beschränken wollten. Es wurden Zeitschriften wie Science oder Scientific American, die weiter verbreitet waren als die eigentlichen Fachjournale, dazu benutzt, Warnungen vor den Folgen der ökologischen Krise »unter's Volk zu bringen«. Es wurden Kongresse organisiert und Bestseller geschrieben.

1962 erschien »Silent Spring« von Rachel Carson (dt. 1970), 1966 »Science and Survival« von Barry Commoner, 1968 wurde »The Population Bomb« von Paul Ehrlich veröffentlicht (dt. 1971). 1971 kam »World Dynamics« von Jay W. Forrester heraus, gefolgt von »The Limits to Growth« von Donella H. Meadows et al. (1972, deutsche Übersetzung im gleichen Jahr). 1976 erschien das Buch »The Genesis Strategy« des Klimawissenschaftlers Stephen Schneider. Allein diese Auflistung macht deutlich, daß vor allem aus den USA erste Anstöße für ein größeres öffentliches Bewußtsein in Bezug auf die Klimaproblematik kamen; bezeichnend sind

die anfänglich großen Verzögerungen bis zum jeweiligen Erscheinen der deutschen Ausgaben.

1963 hielt die Conservation Foundation in den USA eine Tagung mit dem Titel »Implications of Rising Carbon Dioxide Content of the Atmosphere« ab, bei der festgehalten wurde, daß eine Verdopplung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung von 3,8 °C führen könnte. Die erste von seiten der amerikanischen Regierung öffentlich gewordene Feststellung möglicher anthropogener Klimaänderungen mit schwerwiegenden Konsequenzen für die Welt findet sich 1965 in dem Bericht »Restoring the Quality of Our Environment« des President's Scientific Advisory Committee (PSAC). Dieser Bericht wurde zusammengestellt vom Environmental Pollution Panel des PSAC, in dem für die Fragen des sich verändernden Klimas das Sub Panel on Atmospheric Carbon Dioxide mit Wissenschaftlern wie Roger Revelle, Wallace Broecker und Charles David Keeling zuständig waren (nach Kellogg 1987).

Parallel dazu begann man, sich nun auch auf internationaler Ebene verstärkt um die Klimaproblematik zu kümmern. Dies geschah vor allem auf Initiative der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO), die aus der 1873 gegründeten Internationalen Meteorologischen Organisation (IMO) hervorgegangen war. Ein wichtiger Schritt in Richtung standardisierter Datensammlung, der Einbeziehung von Satellitendaten und eines internationalen Datenaustausches zur Verbesserung der Wettervorhersage war in den 60er Jahren die Initiierung der World Weather Watch. Dadurch wurde auch die Datengrundlage erheblich erweitert. 1963 begann man in der WMO zusammen mit dem International Council of Scientific Unions (ICSU) an der Ausarbeitung des Konzepts für ein großes internationales Forschungsprogramm, das Global Atmospheric Research Program (GARP), welches als Vorläufer und Wegbereiter des Weltklimaforschungsprogramms angesehen werden kann, das 1979 nach der ersten Weltklimakonferenz als Bestandteil des Weltklimaprogramms auf den Weg geschickt wurde. Die aktive Phase des GARP erstreckte sich über den Zeitraum von 1967 bis 1982 (siehe dazu z.B. Bruce 1991).

Das Problem von Klimaänderungen und ihren Auswirkungen auf die Menschheit kam ebenfalls in den frühen 60er Jahren in das Blickfeld der zahlreichen WMO-Gremien. So beauftragte auf ihrer

3. Sitzung 1960 in London die WMO Commission for Climatology (CCL) ihren Präsidenten, zu einem adäquaten Zeitpunkt eine Arbeitsgruppe zum Thema Klimafluktuationen einzusetzen. Im Oktober 1961 wurde in Rom das UNESCO/WMO-Symposium on Changes of Climate abgehalten. Auf diesem Treffen im Rahmen des Arid Zone Programme der UNESCO kamen Wissenschaftler unterschiedlichster Disziplinen zusammen, »to obtain a coherent and comprehensive picture of present knowledge, theories and implications of climatic change«. Am Rande diskutierte man hier auf der Basis eines Beitrages von H. Flohn auch den Anstieg der CO₂-Konzentrationen während der letzten 100 Jahre als mögliche Ursache aktueller Klimafluktuationen (Flohn 1963)

Auf dem Symposium in Rom wurde nun endlich Bedarf an der schon 1960 von der WMO/CCL angeregten Arbeitsgruppe zur Untersuchung von Klimafluktuationen angemeldet und diese Arbeitsgruppe in der Zusammensetzung J.M. Mitchell Jr. (Chairman, USA), B. Dzedzevskii (UdSSR), H. Flohn (Deutschland), W.L. Hofmeyr (Südafrika), H.H. Lamb (Großbritannien), K.N. Rao (Indien) und C.C. Wallén (Schweden) im Jahre 1963 eingesetzt. In ihrem Abschlußbericht (WMO 1966), der im August 1965 auf der 4. Sitzung der CCL angenommen wurde, befaßte sich die Arbeitsgruppe vor allem mit der Messung von Klimaparametern, die zur Entdeckung von Klimaänderungen nötig sind, und mit den Verfahren zur statistischen Interpretation von Klimafluktuationen. Hingewiesen wurde auf die Grenzen der bislang benutzten Verfahren, die sich in der Regel auf die Angabe von Mittelwerten, teilweise sogar ohne Angabe der Bezugsperiode, beschränkten; neue Verfahren wie die Bildung gleitender Mittel, die Spektralanalyse oder die Verwendung empirischer Orthogonalfunktionen wurden beschrieben. Die Arbeitsgruppe kam darüber hinaus zu der Feststellung, daß das damalige Wissen über die Natur, Größenordnung und Richtung von Klimafluktuationen »nicht ausreiche in einem Zeitalter subtiler und komplexer Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt, in welchem kleine, aber anhaltende Klimaänderungen große Wirkungen auf den Menschen haben können«. Zu einem vermehrten Wissen über Klimaschwankungen könne ein »Programm routinemäßiger Messungen der atmosphärischen Energiebilanz, sich ändernder Oberflächenbedingungen und bestimmter variabler Charakteristiken der Atmosphäre beitragen«. Insbesondere wird eine permanente Beobachtung der Sonnenein-

strahlung an der Oberkante der Atmosphäre (»Solarkonstante«) gefordert.

Während man sich in den 60er Jahren vor allem auf die Möglichkeit und Entdeckung natürlicher Klimafluktuationen und deren Auswirkungen auf das menschliche Leben konzentrierte, begann man sich in den 70er Jahren auch über den Einfluß des Menschen auf das Klima Gedanken zu machen.

1970 trafen sich in Williamstown, Massachusetts, etwa 40 Fachleute der unterschiedlichsten Disziplinen, um unter Leitung von W.H. Matthews (Fachbereich für politische Wissenschaften des Massachusetts Institute of Technology, MIT) die »Study of Critical Environmental Problems« (SCEP) auszuarbeiten. Eine der Hauptaufgaben dieser Studie lag darin, »to raise the level of informed public and scientific discussion and action on global environmental problems« (zit. nach Kellogg 1987). Was das öffentliche Interesse an den Ergebnissen dieser Studie angeht, so richtete sich dieses vor allem auf die möglichen Umweltauswirkungen der sich damals in der Planung befindlichen Überschallverkehrsflugzeuge und weniger auf die Aussagen über mögliche globale Klimaänderungen durch einen Anstieg der CO₂-Konzentrationen.

Als Fortführung dieser Studie – mit Fokussierung auf das Thema Klima unter Einbeziehung der internationalen wissenschaftlichen Community – kann die 1971 mit finanzieller und organisatorischer Unterstützung einer Vielzahl internationaler Regierungsorganisationen aber auch privater oder öffentlicher Organisationen in Wijk bei Stockholm erarbeitete »Study of Man's Impact on Climate« (SMIC) bezeichnet werden. Deren Hauptaussage war, daß es dem Menschen durchaus möglich sei, das Klima global zu beeinflussen, daß allerdings beim gegenwärtigen Kenntnisstand keine Angabe darüber möglich sei, in welche Richtung die zukünftige Entwicklung des Klimas gehe, ob es eine Abkühlung durch die Aerosolzunahme in der Atmosphäre oder eine Erwärmung durch Zunahme der CO₂-Konzentrationen geben könne. Die »Study of Man's Impact on Climate« faßte den damaligen Kenntnisstand zur Problematik anthropogener Klimabeeinflussung zusammen, und nach W.W. Kellogg, einem der beiden Sekretäre des SMIC-Treffens in Wijk, wurde den Teilnehmern der im folgenden Jahr (1972) in Stockholm stattfindenden 1. UN-Umwelt-Konferenz die Lektüre der Studie wärmstens empfohlen (Kellogg 1987). Auf dieser Konferenz wurde die Einrichtung einer neuen UN-Organisa-

tion zum Schutz der globalen Umwelt beschlossen, das UN Environmental Programme (UNEP).

Welch heftige Diskussionen Topics zu Klimaänderungen und zum menschlichen Einfluß auf das Klima hervorrufen konnten, zeigte sich auf dem im August 1971 von M.I. Budyko aufgrund der aktuellen Umweltdiskussion initiierten WMO-Symposium on Physical and Dynamical Climatology in Leningrad. Bezeichnend ist der Beitrag von H.E. Landsberg, in dem er darauf hinweist, daß die CO₂-Messungen der Vergangenheit wenig zuverlässig seien und »any CO₂ production by man's combustion of fossil fuels is highly unlikely to induce any appreciable climatic changes« (Landsberg 1974)

Im Rahmen des Global Atmospheric Research Program (GARP) fand vom 29. Juli bis 10. August 1974 in Wijk eine International Study Conference zum Thema »The Physical Basis of Climate and Climate Modelling« statt. Diese Veranstaltung wurde von der WMO und dem ISCU organisiert und vom UNEP unterstützt. Das Organisationskommittee dieser Veranstaltung bestand aus B. Bolin (Vorsitz), B. Döös, W. Godson, K. Hasselmann, J. Kutzbach und J. Sawyer. Der Konferenzbericht erschien 1975 und hatte im Aufbau und im Layout frappierende Ähnlichkeit mit den seit 1990 erscheinenden IPCC-Assessment-Reports. Er bot einen umfassenden Überblick über den damaligen Wissensstand und formulierte Forschungsprioritäten für die Zukunft. In den allgemeinen Empfehlungen der Konferenz findet sich die folgende, etwas kryptische Bemerkung: »Clearly even a modest skill in climate prediction would be most valuable. Some claims have been made that such forecast skills already exist. For example, some have predicted that the climate will become warmer, while others have stated that the cooling trend which began in the 40's will continue for several decades.« Es wird angeführt, daß der augenblickliche Wissensstand zum Klima und seiner Variabilität offenbar nicht ausreiche, solche Prognosen zu stützen. Interessant ist auch die in diesem Bericht durchgeführte Bestandsaufnahme zur Entwicklung der Rechnerkapazitäten. Schon 1967 war während einer GARP-Studienkonferenz die Entwicklung von Hochgeschwindigkeitsrechnern gefordert worden. Das Ziel, daß man sich damals für 1972 gesetzt habe, sei erst jetzt im Jahr 1974 mit 30-60 Million Instructions per Second (MIPS) erreicht worden, für fortgeschrittene Prognoserechnungen seien aber im Grunde 500 MIPS nötig.

1975 fand in Norwich das von der WMO veranstaltete International Symposium on Long Term Climate Fluctuations statt. Eines der vielleicht folgenreichsten Ergebnisse dieses Symposiums könnte die Feststellung gewesen sein, daß bodennahe, industriell verursachte Aerosolpartikel nicht unbedingt eine Abkühlung der unteren Atmosphäre zur Folge haben müssen und damit als Folge globaler anthropogener Klimabeeinflussung eher eine Erwärmung zu erwarten sei (WMO 1975).

Diese »Entscheidung« eines noch auf dem SMIC-Symposiums in Wijk offengebliebenen Streitpunktes hatte zur Folge, daß sich W.W. Kellogg in der von der WMO angeforderten Technical Note »Effects of Human Activities on Global Climate« auf die Implikationen einer wärmer werdenden Erde beschränkte. Dieser Übersichtsaufsatz findet sich in einer WMO-Publikation zusammen mit einem auf Anregung des 7. Weltmeteorologischen Kongresses formulierten und 1976 auf der 28. Sitzung des WMO Executive Committee angenommenen »WMO Statement on Climate Change«, das die Möglichkeiten menschlichen Einflusses auf das Klima im Gegensatz zu den Ausführungen von Kellogg eher am Rande erwähnt:

Es wird darin festgestellt, daß trotz großer Fortschritte in der Menschheitsgeschichte der Mensch in seiner ökonomischen und sozialen Entwicklung immer noch stark vom Klima abhängig ist. Dies gilt im Grunde für alle Bereiche menschlichen Handelns, für Industrie, Handel und Landwirtschaft, insbesondere für die Nahrungsmittelproduktion angesichts eines kräftigen Bevölkerungswachstums. Die größten Auswirkungen werden von kurz- oder mittelfristigen Klimaschwankungen erwartet, während sich die langfristige Entwicklung des Klimas unbemerkt von der Gesellschaft vollziehen dürfte. Die Ursachen von Klimafluktuationen seien vielfältiger Natur, es sei aber anzunehmen, daß auch der Mensch durch seine Emissionen von Kohlendioxid und anderen Chemikalien (wie der FCKW) das Klima beeinflusse. Beim augenblicklichen Stand der Kenntnisse über die Atmosphäre und das Klima seien jedoch genaue Abschätzungen über den Einfluß des Menschen auf das Klima unmöglich. Gefordert wird deshalb eine Verbesserung der Datenlage und die Ausweitung einschlägiger Forschung. Es sollten Möglichkeiten zur Prognose kurzfristiger Klimaschwankungen entwickelt werden, insbesondere, um den Regierungen betroffener Staaten eine angemessene Reaktion zu

ermöglichen. Klimatologischer Sachverstand sollte mehr als bisher in die Planung der weiteren ökonomischen und sozialen Entwicklung einbezogen werden (Kellogg 1977).

Auf der 29. Sitzung des WMO Executive Committee im Mai und Juni 1977 wurde dann die 1. Weltklimakonferenz beschlossen. Einen wichtigen Beitrag zur inhaltlichen Vorbereitung dieser wissenschaftlichen Konferenz leistete das International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Laxenburg bei Wien. Die Gründung dieses Instituts im Oktober 1972 geht auf einen Vorschlag des amerikanischen Präsidenten Johnson aus dem Jahr 1966 zurück, eine Einrichtung zu schaffen, in der Wissenschaftler aus Ost und West die den industrialisierten Staaten der Welt gemeinsamen Probleme untersuchen sollten. Ein wichtiges im IIASA angesiedeltes Programm der damaligen Zeit war das Energy Systems Program unter W. Häfele, in dem auch die Auswirkungen der energiebedingten CO₂-Emissionen diskutiert wurden. Arbeiten zu den Auswirkungen von Klimaänderungen wurden seit 1976 mit Nachdruck durchgeführt, wobei immer wieder der Name Jill Williams (später Jäger) fällt. Im Februar 1978 fand in Laxenburg der von WMO, UNEP und SCOPE geförderte IIASA Workshop »Carbon dioxide, Climate and Society« statt (Williams 1978). In drei Arbeitsgruppen wurden die Themen »Kohlenstoffkreislauf«, »Auswirkungen steigender CO₂-Konzentrationen auf Klima und Umwelt« und »Der Zusammenhang zwischen Energie-Strategien und der CO₂-Problematik« behandelt. Etwas pessimistisch fällt dabei im Resümee der ersten Arbeitsgruppe die Feststellung aus, daß das Vertrauen in die Modelle des Kohlenstoffkreislaufes eher ab- als zugenommen habe. Ganz im Gegensatz dazu setzt Arbeitsgruppe 2 auf die Ergebnisse von Klimamodellrechnungen. Es werden Rechnungen mit Strahlungs-Konvektions-Modellen vorgestellt (siehe dazu die Ausführungen im Abschnitt 2.1), die mit einer Unsicherheitsmarge von 25% (!) eine Erwärmung von 2°C (Wolkenobergrenze festgehalten) bzw. 3,2°C (Temperatur an der Wolkenobergrenze fest) bei Verdopplung der CO₂-Konzentrationen prognostizieren. Große Hoffnung legte man in zukünftige Rechnungen mit weiterentwickelten Modellen der globalen Zirkulation (Global Circulation Models/GCM), mit denen es möglich sein solle, auch regionale Klimaänderungen zu prognostizieren; eine aus heutiger Sicht recht optimistische Einschätzung.

1.3 Von der ersten Weltklimakonferenz bis zum 1. Assessment Report des IPCC

Die ausführliche Darstellung der wichtigsten Ereignisse der wissenschaftlichen Klimadiskussion in den 1960er und 1970er Jahren im vorangehenden Abschnitt läßt einen zunehmenden Konsens in der Community der Klimaforscher erkennen, daß steigende CO₂-Konzentrationen zu einer Erwärmung des Klimas führen dürften. Dieser Konsens wurde auf der ersten Weltklimakonferenz, nicht ohne Druck des Vorsitzenden Robert White, bestätigt.

Die erste Weltklimakonferenz fand als »conference of experts on climate and mankind« vom 12. bis 23. Februar 1979 in Genf statt. Die Hauptaufgaben dieser Konferenz wurden auf der 29. Sitzung des WMO Executive Committee definiert und lauteten zum einen, »to review knowledge of climatic change and variability, due both to natural and anthropogenic causes«, und zum anderen, »to assess possible future climatic changes and variability and their implications for human activities«. Während der Konferenz entwickelte sich die Frage des menschlichen Einflusses auf das Klima zu einem zentralen Thema, das dann auch in der Erklärung der Weltklimakonferenz angemessen berücksichtigt wurde. Diese Erklärung beginnt mit einem Appell an die Nationen, »to take full advantage of man's present knowledge of climate; to take steps to improve significantly that knowledge; to foresee and to prevent potential man-made changes in climate that might be adverse to the well-being of humanity«. Es wird darauf hingewiesen, daß alle Länder von Klimaänderungen betroffen sein werden, daß aber die Entwicklungsländer ganz besonders empfindlich gegenüber Klimaänderungen sein werden. Das Klima werde schon heute sichtbar auf lokaler und regionaler Skala zum Teil irreversibel verändert, und es stehe zu befürchten, daß menschliche Aktivitäten auch im globalen Maßstab klimaändernd wirken könnten.

Im Berichtsband der Klimakonferenz findet sich ein Beitrag, der das Wissen über den damaligen Zustand des Klimas und die Wahrnehmung einer möglichen Bedrohung durch Klimaänderungen sehr anschaulich zusammenfaßt. Es handelt sich um den Beitrag von F. Kenneth Hare (Inst. f. Env. Studies, Univ. of Toronto, Can.) über »Climatic Variation and Variability«, in dem einleitend auf den katastrophalen Einfluß der »Dust-Bowl«-Periode in den USA der 30er Jahre und die Dürre in der Sahel-Zone 1968-73 hin-

gewiesen wird, Ereignisse, die nicht vorhergesehen wurden und auf deren Wirkung es nur recht improvisierte Reaktionen gab. 1972 und in den nachfolgenden Jahren habe es zahlreiche Klimaa-nomalien mit Auswirkungen auf Ernteerträge, Nutztierherden, Fischerei oder die Schifffahrt in den arktischen Regionen gegeben. Weltweit nehme die Sorge über mögliche Klimaänderungen zu, nach einer Häufung von Dürren, Überschwemmungen, schweren Kälteeinbrüchen und Stürmen. Es wird darauf hingewiesen, daß detaillierte Wetteraufzeichnungen eine relativ neue Entwicklung sind und man sich über vergangene Klimaänderungen nur über Proxy-Daten Gewissheit verschaffen kann. Die Entwicklung des Menschen habe in einer relativ kühlen Phase der Klimageschichte stattgefunden, einer »abnormalen« Phase im Vergleich zu den mehr oder weniger eisfreien 5-10°C wärmeren Epochen der Erdgeschichte. Für die 70er Jahre wird eine Zunahme extremer Temperaturen und Niederschlagsereignisse festgestellt, was aber durch genauere Analysen nicht bestätigt werden kann. Interessanterweise wird eine Zunahme der Temperaturvariabilität mit einer globalen *Abkühlung* in Verbindung gebracht, die eine Zunahme des meridionalen Temperaturgradienten durch stärkere Abkühlung in den arktischen Regionen mit sich bringe. Heute argumentiert man häufig anders herum.

Die Dürre im Sahel zog mehr als andere Ereignisse dieser Art die Aufmerksamkeit auf die Tatsache, daß es Klimavariationen geben kann, die das Wohlergehen des Menschen signifikant stören können. Im Aufsatz von Hare wird auf die Ergebnisse der UN Conference on Desertification von 1977 eingegangen und ergänzend bemerkt, daß die Dürre durch persistente Anomalien der Zirkulation verursacht worden war, wodurch der in der Atmosphäre ausreichend vorhandene Wasserdampf nicht zum Abregnen kam. Ansonsten wird auf vorangegangene Dürren in dem Gebiet in den frühen 1910er Jahren, Ende der 20er Jahre und in den 40er Jahren hingewiesen.

Was den Schutz der menschlichen Gesellschaft vor den Unbil-den von Klimaänderungen angeht, so macht der Autor folgende Vorschläge:

- Entwicklung eines besseren »Klimagedächtnisses« insbesondere bei den Entscheidungsträgern. Ein oder zwei Jahre nach einer extremen Dürre oder Überflutung verlieren die meisten

Länder das Interesse an einer Aufrechterhaltung getroffener Maßnahmen.

- Klimatologen werden aufgefordert, Klimaänderungen möglichst rechtzeitig zu antizipieren und Entscheidungsträger darauf hinzuweisen (auch wenn dies ein harter Kampf sein mag).
- Das Verständnis für die Ursachen von Klimaänderungen ist zu verbessern, um eventuell Vorhersagen zu ermöglichen.
- Unerwünschte Klimavariationen könnten vielleicht (in Zukunft) durch eine Kontrolle des Klimas verhindert werden.

Ein weiterer wichtiger Meilenstein der wissenschaftlichen Diskussion der Klimaproblematik war die 1985 von ICSU, UNEP und WMO organisierte internationale Konferenz in Villach »on the assessment of the role of carbon dioxide and of other greenhouse gases in climate variations and associated impacts«. An dieser Konferenz in Villach nahmen Wissenschaftler aus 95 Ländern teil, darunter Vertreter aus den Industrienationen und aus den Entwicklungs- und Schwellenländern, die sich insbesondere auch mit den politischen Folgerungen aus dem erwarteten Klimawandel befaßten. Als Grundlage für die politischen Implikationen wurde auf der Konferenz der Wissensstand zur Treibhausgasproblematik festgehalten und bewertet. Ende 1985 stellte sich dieser demnach folgendermaßen dar:

- Die Konzentrationen treibhausaktiver Gase steigen.
- Die Rolle anderer Treibhausgase entspricht in ihrer gesamten Größenordnung der des CO₂.
- Die Zunahme treibhausaktiver Gase dürfte gegenüber anderen Faktoren wie den Aerosolen, Änderungen der Sonneneinstrahlung oder der Vegetation die wichtigste Ursache für Klimaänderungen sein.
- Eine Verdopplung der in ihrer Strahlungswirksamkeit äquivalenten Konzentrationen aller Treibhausgase incl. CO₂ gegenüber dem vorindustriellen Level ist bis 2030 zu erwarten.
- Diese Verdopplung hat nach aktuellen Modellrechnungen eine Erhöhung der mittleren Gleichgewichts-Oberflächen-Temperatur von 1,5 bis 4,5 °C zur Folge.
- Abweichungen von dieser Spanne sind aufgrund von Unsicherheiten in den Modellrechnungen möglich, und zudem ist aufgrund der Trägheit der Reaktion des Ozeans mit einer Verzögerung

rung beim Erreichen der modellierten Gleichgewichtstemperaturen zu rechnen.

- Die prognostizierten Temperaturerhöhungen sind mit einem Anstieg des Meeresspiegel zwischen 20 und 140 cm verknüpft; ein Abschmelzen antarktischen Eises wird nicht vor Ende des nächsten Jahrhunderts erwartet.
- Änderungen des Klimas im regionalen Scale sind noch nicht sicher abzuschätzen, man rechnet jedoch mit folgenden regionalen Eigenheiten des Klimawandels:
 - Im Spätherbst und Winter größere Erwärmung in höheren Breiten,
 - Zunahme des mittleren Abflusses in den höheren Breiten,
 - Zunahme sommerlicher Trockenperioden in Kontinenten mittlerer Breiten,
 - in tropischen Regionen geringere Temperaturerhöhungen als im globalen Mittel, jedoch Zunahme der potentiellen Verdunstung und in Feuchtgebieten des konvektiven Niederschlags.
- Die Auswertung von Beobachtungsdaten ergibt eine Temperaturerhöhung von 0,3 bis 0,7 °C für die letzten 100 Jahre, was mit den Modellprognosen konsistent wäre, aber nicht mit endgültiger Sicherheit den Wirkungen der Treibhausgase allein zugeschrieben werden kann.
- Aufgrund der Auswirkungen von Klimaschwankungen in der Vergangenheit kann bei einem Eintreten der prognostizierten Temperaturerhöhungen mit wesentlichen Auswirkungen auf globale Ökosysteme, Landwirtschaft, Wasserressourcen und Meereseis gerechnet werden.

Ein Ergebnis der Konferenz von Villach war auch die Bildung der Advisory Group on Greenhouse Gases (AGGG), die als Vorläuferorganisation des 1988 gebildeten Intergovernmental Panel on Climate Change gesehen werden kann, der in der Folge die wissenschaftliche und politische Diskussion über die globale Klimaproblematik durch seine Arbeiten maßgeblich beeinflusste.

Der IPCC wurde im Jahre 1988 auf der Basis eines formellen Antrags der General Assembly (GA) der Vereinten Nationen (Resolution GA 43/53 vom 6. Dezember 1988) durch die World Meteorological Organization (WMO) und das United Nations Environmental Programme (UNEP) etabliert.

Nach dem Auftrag der GA bestehen die Aufgaben des IPCC darin, den Stand des Wissens zum Treibhauseffekt, zu seinen möglichen Auswirkungen und zu politischen Reaktionsmöglichkeiten aufzuarbeiten. Der IPCC, der sich zwar aus Wissenschaftlern zusammensetzt und eine große Zahl weiterer Wissenschaftler in den Reviewprozeß seiner Berichte (Peer Review) einbezieht, betreibt aber selbst keine Forschung, sondern versucht, den Stand der Forschung zu evaluieren bzw. Konsens darüber herbeizuführen, was die Wissenschaft weiß und was sie nicht weiß und wie hoch die Unsicherheiten des Wissens einzuschätzen sind. Zugleich ist der IPCC auch kein rein wissenschaftliches Gremium, sondern als »Intergovernmental Panel« zwischen Politik und Wissenschaft angesiedelt.

Der IPCC hat zur Durchführung seiner Aufgaben die folgenden drei Arbeitsgruppen gebildet:

1. The Science of Climate Change
2. Impacts, Adapation and Mitigation
3. Socioeconomic and cross-cutting issues.

Den Vorsitz des IPCC übernahm B. Bolin, ein schwedischer Wissenschaftler, der schon seit den 1960er Jahren das Thema Kohlenstoffkreislauf und Klimawandel bearbeitete und an der Organisation einschlägiger Kongresse beteiligt war. Der IPCC legte seinen ersten »Assessment Report« 1990 vor, der im Mittelpunkt der Diskussionen auf der 2. Welt-Klimakonferenz im selben Jahr stand.

Während die 1. Weltklimakonferenz und die Villach-Konferenz im wesentlichen noch als Konferenzen von Wissenschaftlern und Fachleuten unterschiedlichster Disziplinen zu sehen waren, war die 2. Weltklimakonferenz vom 29. Oktober bis 7. November 1990 in Genf eine stärker politisch orientierte Veranstaltung, auf der die Weichen für die 1992 folgende Konferenz für Umwelt und Entwicklung (UNCED) in Rio und damit die Klimarahmenkonvention endgültig gestellt wurden. Über diesen Prozeß der Verhandlungen zur Klimarahmenkonvention und deren Umsetzung wird in einem anderen Beitrag des vorliegenden Buches berichtet.

2. Prognosen des Klimas

In einem Aufsatz von Revelle und Suess wurde schon 1957 darauf hingewiesen, daß der Mensch mit seinen Emissionen klimawirksamer Gase ein Experiment im globalen Maßstab durchführe, auf dessen Ergebnisse wir nur zu warten brauchten. Wegen der möglichen Folgen von Klimaänderungen für die Menschheit dürfte es jedoch nicht sinnvoll sein, das Ergebnis dieses Experiments tatenlos abzuwarten. Trotz begrenzten Wissens wurden deshalb schon früh Prognosen über unser zukünftiges Klima aufgestellt. Die ersten Klimaprognosen für den Fall zunehmender CO₂-Konzentrationen basierten auf einfachen Betrachtungen der Strahlungsbilanz am Erdboden; heute wird dagegen fast ausschließlich auf die Ergebnisse von Modellrechnungen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodellen zurückgegriffen.

Auch was die Einschätzung des menschlichen Einflusses auf das derzeitige Klima angeht, ist man auf die Ergebnisse von Modellrechnungen angewiesen. In der oftmals schwer nachzuweisenden Glaubwürdigkeit der Ergebnisse dieser Modellrechnungen steckt eine der Hauptunsicherheiten der aktuellen Klimadebatte. Es erscheint deshalb sinnvoll, den Entwicklungspfad der unterschiedlichen Klimamodelle in der Vergangenheit nachzuzeichnen und auf die spezifischen Unsicherheiten von Klimamodellen einzugehen.

2.1 Historische Entwicklung von Klimamodellen: Einfache Klimamodelle

Alle im Abschnitt 1.1 genannten Abschätzungen von Temperaturänderungen in Abhängigkeit von Schwankungen der CO₂-Konzentration seit den Arbeiten von Callendar beruhen auf der Betrachtung der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche. Durch eine Erhöhung der CO₂-Konzentration kommt es zu einer Zunahme der zum Erdboden gerichteten Wärmestrahlung aus der Atmosphäre, die aus Bilanzgründen durch die Zunahme der Ausstrahlung der Erdoberfläche und damit Temperaturerhöhung derselben kompensiert werden muß. Transporte sensibler und latenter Wärme werden in diesen Kalkulationen nicht berücksichtigt, so daß die Atmosphäre sich im Grunde nur durch ihre (meist aufgrund experimenteller

Untersuchungen ermittelten und in den Rechnungen vorgegeben) optischen Eigenschaften manifestiert. Wegen dieses Sachverhaltes kann man hier im Grunde noch nicht von »Klimamodellen« sprechen.

Auch wenn die Entwicklung von komplexen Klimamodellen auf der Basis der hydrodynamischen Grundgleichungen durch Vorarbeiten in Princeton und anderen Instituten der Welt im Grunde schon in die Wege geleitet worden war, waren es zunächst einfache, eher in der Tradition der Arbeiten von Callendar, Plass und Möller stehende Klimamodelle, mit denen das Klimasystem und insbesondere das CO₂-Problem erkenntnisfördernd untersucht werden konnten. Wegen der begrenzten Rechnerkapazitäten konnten allein mit solchen einfachen Modellen Parameter variiert und alternative Ansätze durchgerechnet werden. Um von den Nachteilen der ersten Ansätze von Callendar, Plass, Möller u.a. zur Beschreibung des Einflusses von CO₂-Konzentrationsänderungen auf die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche wegzukommen, wurden fast zeitgleich zwei Entwicklungslinien eingeschlagen:

Bei der einen blieb man dabei, die Energiebilanz an der Erdoberfläche zu betrachten, ersetzte allerdings den deterministischen Ansatz, der u.a. das Strahlungsgesetz von Stefan-Boltzmann enthielt, durch einen empirischen Ansatz. Damit konnte man die inzwischen durch Messungen am Boden oder von Satelliten aus gewonnenen Daten der planetarischen Energiebilanz in die Modellansätze einfließen lassen und horizontale Energietransporte berücksichtigen. Es sind hier vor allem die grundlegenden Arbeiten von Budyko (1968 in russisch und 1969) und Sellers (1969) zu nennen; allerdings hatte schon Ångström 1928 die Breitenabhängigkeit des Klimas mit einem eindimensionalen, von der Breite abhängigen Energiebilanzmodell berechnet (Ångström 1928). Die Anwendung der Energiebilanzmodelle nach Budyko und Sellers auf das CO₂-Problem ergab Temperaturänderungen von 0,6°C bis 3,3°C bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentrationen (Schlesinger 1988). Größere Aufmerksamkeit erregten allerdings Parameterstudien mit Hilfe dieser Modelle, in denen sich herausstellte, daß das Klimasystem zumindest nach diesem sehr vereinfachenden, aber im Vergleich zu Rechnungen mit globalen Zirkulationsmodellen durchsichtigeren und nachvollziehbareren Ansatz sehr empfindlich auch auf geringe Änderungen der Einstrahlung reagieren könnte.

Der zweite Weg war die Entwicklung von Strahlungs-Konvektions-Modellen, mit Hilfe derer die vertikale Struktur der Atmosphäre expliziter berücksichtigt werden kann. Das erste Modell dieser Art wurde 1964 von Manabe und Strickler vorgestellt und war in der Lage, das vertikale Temperaturprofil in Troposphäre und Stratosphäre einigermaßen gut darzustellen. Dieses Temperaturprofil kommt einerseits durch strahlungsbedingte Erwärmung bzw. Abkühlung in den einzelnen Luftschichten zustande, zu deren Berechnung ein Strahlungstransportmodell unter Annahme einer ganz bestimmten vertikalen Verteilung absorbierender Substanzen wie Ozon, Wasserdampf oder CO₂ eingesetzt wird, und zum anderen durch die Berücksichtigung (meist in stark parametrisierter Form) nicht strahlungsbedingter Transporte von Energie von der Erdoberfläche in die Atmosphäre und deren konvektiver Umverteilung innerhalb der Atmosphäre. 1967 wurde zum ersten Mal ein Strahlungs-Konvektions-Modell zur Abschätzung der Wirkung einer Verdopplung der CO₂-Konzentration eingesetzt; man erhielt dabei für die Temperaturerhöhung Werte zwischen 1,3 und 3°C (Manabe/Wetherald 1967). Über diesen Bereich gehen auch andere Studien mit Strahlungs-Konvektions-Modellen, aber anderen Parametrisierungsansätzen, nicht wesentlich hinaus (Schlesinger 1988).

2.2 Globale Zirkulationsmodelle

Die Entwicklung komplexer Klimamodelle, insbesondere der heute weithin benutzten globalen Zirkulationsmodelle, ist eng mit dem ersten Einsatz elektronischer Rechenanlagen in der Meteorologie verbunden. Vor allem die auf den hydrodynamischen Grundgleichungen basierenden Rechnungen mit solchen globalen Zirkulationsmodellen (im angesächsischen Sprachgebrauch »Global Circulation Models« GCM) sind im Vergleich zu anderen Modellansätzen extrem aufwendig und stoßen in der Regel an die Grenzen der jeweils verfügbaren Rechnerkapazitäten. Es verwundert daher nicht, daß die Modell- (bzw. Programm-) Entwicklung eng mit der Entwicklung neuerer und leistungsfähigerer Rechnergenerationen verknüpft ist. Nur Arbeitsgruppen in Instituten mit entsprechender Recherausstattung waren und sind auch heute in der Lage, komplexe globale Zirkulationsmodelle einzusetzen.

Schon während des ersten Weltkrieges versuchte der Engländer Richardson das hydrodynamische Gleichungssystem mit Hilfe numerischer Verfahren zu lösen. An eine auf diese Weise gewonnene Wettervorhersage war allerdings noch nicht zu denken, denn nach den Abschätzungen Richardsons wären etwa 64 000 menschliche »Computer« nötig gewesen, das Wetter zumindest in »real time« anhand der Gleichungen vorherzusagen (nach Thompson 1961). Aber auch mit den ersten elektronischen Computern, die Ende der 40er, Anfang der 50er Jahre zur Verfügung standen, waren zunächst nur Fallstudien möglich; zudem mußten die zugrundeliegenden Gleichungen stark vereinfacht werden, um die Kapazität der Rechner nicht zu überfordern. Die größten Schwierigkeiten machte dabei der begrenzte Speicherplatz.

Herausragendes Ereignis in der Entwicklung der numerischen Wettervorhersage war 1949 die Gründung einer meteorologischen Arbeitsgruppe im Institute for Advanced Study (IAS) in Princeton. Dies geschah auf Anregung von J. v. Neumann, der für das »Electronic Computer Project« des IAS Anwendungsgebiete der neuentwickelten Computertechnologie vorzuschlagen hatte. Unter der Leitung von Charney und der Mitarbeit von Meteorologen wie Fjørtoft, Smagorinsky u.a. wurden »Expeditionen« zum ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*) der US-Army gemacht und im März 1950 erste Rechnungen mit einem verallgemeinerten barotropen Modell der Atmosphäre durchgeführt. Erste Vorhersagen mit einem einfachen, zweischichtigen baroklinen Modell folgten 1952. Die erste operationelle Wettervorhersage wurde dann 1955 mit einem 3-Schichten-Modell durchgeführt (Smagorinsky 1983).

Parallel zu den Entwicklungen in den USA wurden barokline Modelle auch in England von Eady und in Norwegen von Eliassen entwickelt. In Deutschland war es Hinkelmann, der ein 5-schichtiges baroklines Vorhersagemodell entwickelte, zunächst unter Zuhilfenahme einer einfachen mechanischen Rechenmaschine. Illustrativ in diesem Zusammenhang ist, daß der Deutsche Wetterdienst erst im Jahre 1965 einen eigenen Computer bekam; zuvor mußte in Paris oder Amerika stundenweise Rechnerkapazität angemietet werden (Edelmann 1986).

Ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu den numerischen Klimamodellen ist das 1955 von Phillips abgeschlossene (numerische) Experiment zur allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre

(Phillips 1960). Es gelang ihm, die Gleichungen seines 2-Schichten-Modells über etwa einen Monat stabil zu integrieren. Dabei zeigten sich deutlich die für die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre typischen Grundmuster, wie z.B. die Ausbildung stehender Wellen. Phillips selbst bezeichnete sein Experiment als natürliche Weiterentwicklung der Arbeiten von Charney und seiner Gruppe zur numerischen Wettervorhersage. Aufgrund der Ergebnisse von Phillips wurde im selben Jahr in Princeton eine Konferenz über »The Application of Numerical Integration Techniques to the Problem of General Circulation« abgehalten, auf der J.v. Neumann erste Bemerkungen zur Möglichkeit von Klimavorhersagen machte und dabei auch auf erkenntnistheoretische Schwierigkeiten hinwies (von Neumann 1960).

Im selben Jahr wurde auf den Vorschlag v. Neumanns hin gemeinsam vom amerikanischen Weather Bureau und der US Air Force bzw. Navy eine General Circulation Research Section unter der Leitung von J. Smagorinsky eingerichtet. Die Arbeitsgruppe wechselte in den folgenden Jahren mehrmals den Namen und ist seit 1963 als Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) der NOAA (damals noch ESSA) bekannt; ein Name, der mit der Entwicklung bekannter Klimamodelle verknüpft ist.

Die Weiterentwicklung des Modellansatzes von Phillips unter Berücksichtigung zusätzlicher physikalischer Prozesse fand Mitte der 60er Jahre in den USA ihren Höhepunkt. Zu nennen sind hier vor allem Arbeiten von Smagorinsky und Manabe aus dem GFDL aus den Jahren 1963 und 1965, von Leith aus dem Lawrence Radiation Laboratory (1965), von Mintz und Arakawa von der University of California, Los Angeles (UCLA), und im Jahr 1967 von Kasahara und Washington aus dem National Center for Atmospheric Research (NCAR).

Im Jahre 1969 veröffentlichten Manabe und Bryan die Ergebnisse ihrer »climate calculations with a combined ocean-atmosphere model«. Bei diesen Rechnungen wurde das damals am weitesten fortgeschrittene Ozean-Modell mit einer vertikalen Auflösung von 6 Schichten mit dem atmosphärischen 9-Schichten-Modell des GFDL verknüpft. Die dabei benutzte extrem einfache Land-Meer-Verteilung mit einem einzigen einfach geformten Kontinent zeigt, welche Schwierigkeiten man damals mit der numerischen Behandlung eines derart komplexen Systems mit unterschiedlichen Zeitkonstanten hatte. Es ist daher auch nicht weiter

verwunderlich, daß bis heute umfangreiche Simulationen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modellen recht selten geblieben sind. Häufig wird auch heute noch in Klimasimulationen der Ozean als »Sumpf« betrachtet, der als Lieferant von Wasserdampf dient, aber keine eigene Zirkulation aufweist. Ein anderer Ansatz berücksichtigt zumindest die Ausbildung einer Mischungsschicht an der Ozeanoberfläche, kann aber ebenfalls nicht zur Untersuchung der meisten Rückkopplungseffekte dienen, die sich aus der Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre und dem Ozean (und womöglich der Kryosphäre!) beispielsweise durch Änderungen der thermohalinen Zirkulation des Ozeans durch Temperatur- oder Süßwassereinflüsse ergeben.

Parallel zu der Entwicklung von Gittermodellen der globalen Zirkulation, bei denen die numerische Lösung der Integralgleichungen auf einem dreidimensionalen Gitternetz durchgeführt wird, kam es zu einer Weiterentwicklung spektraler Methoden, die ebenfalls zur numerischen Behandlung geophysikalischer Strömungsprobleme eingesetzt werden können. Vor allem die Verbesserung der Algorithmen zur Fourier-Transformation, insbesondere die Entwicklung des Fast-Fourier-Transform-Algorithmus von Cooley und Tukey im Jahre 1965, und die Entwicklung effizienterer Methoden zur numerischen Behandlung der Spektralform der Bewegungsgleichungen von Orszag und Eliassen im Jahre 1970 gaben einer größeren Zahl von Arbeitsgruppen in der Welt Anlaß, spektrale globale Zirkulationsmodelle zu entwickeln. Aber auch schon vorher hatte man mit spektralen Modellen experimentiert, wie die Arbeit von Robert (1966) zeigt. Anfang der 70er Jahre war es insbesondere der Australier Bourke, der 1972 bzw. 1974 sein »Multi-Level Spectral Model« vorstellte (Bourke 1974). Eine Weiterentwicklung dieses Modelltypus ist das spektrale Modell des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage, das in einer abgewandelten Form (unter dem Namen ECHAM) auch vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg für Klimasimulationen verwendet wird.

Die CO₂-Problematik spielt in den Anfangsjahren der Entwicklung numerischer Wettervorhersagemodelle und von Modellen der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre noch eine untergeordnete Rolle. Sie wurde zwar schon auf der oben genannten Konferenz in Princeton von 1955 behandelt, ohne aber große Aufmerksamkeit zu erhalten. Hauptaufgabe in dieser Zeit war die Entwicklung

und Verifikation der jeweiligen Modelle, die Weiterentwicklung der Modelle durch Berücksichtigung immer neuer Prozesse (z.B. die Prognose von Bewölkung oder Niederschlag) und der Zugewinn an Einsicht in die wichtigsten atmosphärischen Prozesse durch Modellexperimente.

Daß die Problematik anthropogener Klimaveränderungen und auch andere mit der technischen Entwicklung zusammenhängende Probleme bei den damals hauptsächlich Beteiligten durchaus wahrgenommen wurden, zeigt ein Aufsatz J. v. Neumanns in der Juni-Ausgabe der Zeitschrift Fortune des Jahres 1955 mit dem Titel »Can we survive technology?«. In diesem Aufsatz wird unter anderem darauf hingewiesen, daß sich die Zusammensetzung der Atmosphäre durch die stetigen CO₂-Emissionen der letzten Jahrzehnte derart verändert habe, daß es dadurch zu einer Temperaturerhöhung von etwas mehr als 0,5 °C gekommen sei. Zugleich weist v. Neumann auf die Möglichkeit kontrollierter Eingriffe in das (Welt-)Klima hin, deren positive, aber auch (im Konfliktfall gewollte) negative Folgen vorhersagbar würden. Daß dies durch die in diesen Jahren in der Entwicklung befindlichen bzw. projektierten Atmosphärenmodelle geschehen könnte, wird nicht ausdrücklich gesagt, dürfte seinen Ausführungen aber sicher zugrunde liegen. Das Thema gewollter großräumiger Klimaänderungen wurde in der Folge vor allem von sowjetischen Forschern behandelt, wobei es nicht bei »akademischen« Untersuchungen und Modellrechnungen blieb, sondern auch in realiter experimentiert wurde.

Interessanterweise war auch 1970 in den USA die Entwicklung bzw. Anwendung von Klimamodellen wieder mit der Suche nach Anwendungsgebieten für einen neuentwickelten Hochleistungsrechner verknüpft. So suchte die Advanced Research Projects Agency (ARPA) Anwender für ihren Parallelrechner ILLIAC IV und fand sie in einer Arbeitsgruppe der Rand Corporation in Los Angeles. Diese Gruppe arbeitete zunächst im Rahmen des von der National Science Foundation (NSF) finanzierten »Rand Climate Modeling Program«, wurde dann aber von der ARPA unterstützt, wobei die Arbeiten als geheim eingestuft und unter dem Code-Namen »Nile Blue« geführt wurden. Unter anderem wurden die Auswirkungen von möglichen Aktivitäten der Sowjetunion zur Klimamodifikation untersucht und innerhalb des etwa sechs Jahre an-

dauernden Programms auch globale Zirkulationsmodelle eingesetzt (Hecht/Tirpak 1995).

Der Einsatz von globalen Zirkulationsmodellen zur Untersuchung des Einflusses steigender CO₂-Konzentrationen auf das Klima erfolgte relativ spät. Erst im Jahr 1975 veröffentlichte Manabe zusammen mit seinem Kollegen Wetherald, mit dem er schon 1967 eine vielbeachtete Arbeit auf der Basis eines Strahlungs-Konvektions-Modells zur Berechnung der Temperaturerhöhung bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration herausgebracht hatte (s. oben), die Ergebnisse von Rechnungen mit einem globalen Zirkulationsmodell zur selben Problemstellung. In ihrem dreidimensionalen Zirkulationsmodell mit idealisierter Geographie steigt die mittlere Temperatur bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentrationen in Bodennähe um 2,9°C an, während in der Stratosphäre die Temperatur abnimmt. Diese Ergebnisse wurden vorab schon 1974 in einem Aufsatz von Smagorinsky veröffentlicht, in dem dieser einen fundierten Überblick über den damaligen Stand der numerischen Klimasimulation gibt (Smagorinsky 1974; Manabe/Wetherald 1975). Die in der Folgezeit mit Hilfe des GFDL-Modells und der Modelle anderer Arbeitsgruppen durchgeführten Abschätzungen zur Änderung des Klimas als Folge einer Zunahme (vorgegeben wird in der Regel ein Verdopplung oder Vervierfachung) der CO₂-Konzentrationen ergaben Werte für eine Temperaturerhöhung im Bereich zwischen 2 und 4 °C, also eine recht große Übereinstimmung der GCM-Rechnungen.

Viele der in den 60er Jahren benutzten Ansätze (von denen etliche, wie etwa das σ -Koordinatensystem, sogar noch auf Ideen von Phillips zurückgehen) und die bei den damaligen Experimenten gewonnenen Erkenntnisse zum Verhalten der numerischen Lösungen der Modellgleichungen (und deren Abhängigkeit vom jeweiligen Initialisierungsverfahren) finden auch heute noch in aktuellen zur Klimaprognose benutzten Modellen Berücksichtigung. Der gemeinsame Ursprung all dieser Modelle (das gilt besonders für die spektralen Modelle, die im wesentlichen alle auf einen Algorithmus von Bourke zurückgehen) schränkt erheblich die Möglichkeiten ein, die mit einem bestimmten Klimamodell erzielten Aussagen über mögliche anthropogene Klimaänderungen durch einen Vergleich mit den Ergebnissen anderer Modelle quasi zu »verifizieren«.

2.3 Aktueller Stand der Modellrechnungen

Seit 1989 werden mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen Rechnungen durchgeführt, die die Reaktion des Klimasystems auf einen transienten Anstieg der CO₂-Konzentrationen simulieren sollen. Dabei haben sich aus der Forschungslandschaft vier Forschergruppen herausgeschält, die mit ähnlichen Ansätzen und Zielsetzungen arbeiten:

In den USA sind es zum einen die Gruppen um Manabe und Stouffer vom GFDL der NOAA und um Washington und Meehl vom NCAR, die mit gekoppelten Modellen transiente Rechnungen durchführen. In Großbritannien sind die Rechnungen mit dem Modell des Hadley Centre (Slingo, Murphy) zu nennen, und in Deutschland ist es das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, das zusammen mit dem deutschen Klimarechenzentrum Rechnungen mit dem Modell ECHAM durchführt (Cubasch, Hasselmann).

Mit diesen transienten Rechnungen versucht man einerseits, das Klima und seine Reaktion auf Änderungen der Konzentration von Treibhausgasen seit dem Einsetzen der Industrialisierung Mitte des letzten Jahrhunderts nachzuvollziehen und andererseits, die zukünftige Entwicklung des Klimas aufgrund von CO₂-Emissionsszenarien vorherzusagen. Aufgrund des langen Zeitraums, der simuliert wird, werden nicht die am höchsten auflösenden Modelle der jeweiligen Forschergruppen verwendet; so wird z.B. beim MPI in Hamburg für die Rechnungen das T21 Atmosphärenmodell eingesetzt mit einer Auflösung von etwa 5,6°x5,6°. Das Modell des Hadley Centre ist dagegen mit 2,5°x3,75° relativ hoch aufgelöst.

Die Themen aktueller Veröffentlichungen über die Ergebnisse von Klima-Modellrechnungen lassen sich folgendermaßen charakterisieren:

- Vorstellung der Ergebnisse transienter Rechnungen mit gekoppelten Modellen;
- Berücksichtigung variabler Aerosolkonzentrationen in der Atmosphäre;
- weitergehende Auswertungen der Ergebnisse von Modellrechnungen;

- Verifikation der Modellrechnungen und Suche nach einem anthropogenen Klimaänderungssignal;
- Kritik an Modellannahmen wie der Flußkorrektur;
- weitere Standardisierung und Systematisierung des Vergleichs komplexer Klimamodelle.

Im Vorfeld der 1. Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention in Berlin gab es eine Reihe medienwirksamer Vorstellungen der Ergebnisse transienter Modellrechnungen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen. Mit diesen Rechnungen wurde schon Anfang der 90er Jahre begonnen, und es wird nun ein großer Aufwand betrieben, die dabei angefallenen Datenmengen auszuwerten und darzustellen.

Einen umfassenden Überblick über die Erwartungen, die an zukünftige Rechnungen mit Klimamodellen gekoppelt sein können, bietet der Bericht eines Forums zum »Global Change Modeling«, das im Oktober 1994 im Rahmen des US Global Change Research Program (USGCRP) abgehalten wurde. Darin fordert das Forum, das sich aus einer Reihe von Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen zusammensetzte, vor allem einen stetigen Ausbau der Modellkapazitäten, darunter eine wesentlich verbesserte räumliche Auflösung der Modelle (Gitterabstand kleiner als $2,5^\circ$), eine bessere Berücksichtigung des Wasserdampfes in der Atmosphäre (inkl. Wolkenbildung und Wechselwirkung mit der Strahlung), eine höhere Auflösung der Grenzschicht, eine bessere Berücksichtigung konvektiver Prozesse sowie eine Verbesserung bei der Berücksichtigung der unterschiedlichen Komponenten des Klimasystems (wie Ozean, Boden, Pflanzen etc.) und deren Kopplung. Höhere Modellauflösung und Verbesserungen bei der Kopplung der Komponenten des Klimasystems sollen dazu führen, daß in Zukunft auf sog. Flußkorrekturen verzichtet werden kann. Hingewiesen wird weiterhin auf die Notwendigkeit, die Modelle (oder auch Teile davon) anhand von Beobachtungen zu testen, auch wenn dazu teilweise ein relativ großer Rechenaufwand nötig ist. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, daß Beobachtungen bestimmter Parameter noch stark fehlerbehaftet sind, wie z.B. die der relativen Feuchte in manchen Gegenden der Erde mit etwa 10%.

3. Stand des Wissens zum anthropogenen Treibhauseffekt: Der 2. Assessment Report des IPCC

Einen umfassenden Überblick über den augenblicklichen Wissensstand zum Problem des anthropogenen Klimawandels, über die Folgen von Klimaänderungen und die gesellschaftlichen und politischen Implikationen des Problemkomplexes bieten die Assessment Reports des IPCC. Der erste Assessment Report des IPCC erschien 1990 zur 2. Weltklimakonferenz (siehe Abschnitt 1.3 dieses Beitrags). Vor allem der Bericht der Arbeitsgruppe 1 des IPCC (»Science«) mit dem Titel »Climate Change« wurde als Informationsquelle und Referenz in der Klimadiskussion ausgiebig genutzt (Houghton/Jenkins/Ephraums 1990).

Seit Juni 1996 ist nun der 2. Assessment Report (»Second Assessment Report/SAR) des IPCC vollständig als dreibändiges Werk mit den Ergebnissen der drei Arbeitsgruppen des IPCC erhältlich:

1. The Science of Climate Change
2. Impacts, Adaptions and Mitigation of Climate Change
3. Economic and Social Dimensions of Climate Change

Darin sind jeweils eine Zusammenfassung für die politischen Entscheidungsträger (»Summary for Policymakers«) und im Falle der Berichte der Arbeitsgruppen I und II ein etwas ausführlicheres »Technical Summary« enthalten. In einer separaten Ausgabe liegt der »Synthesis Report« mit den wichtigsten Aussagen aller drei Arbeitsgruppen vor.

Die Berichte des IPCC sind einer umfangreichen und langwierigen Review-Prozedur unterworfen, die einen wissenschaftlichen Peer-Review und einen Government-Review umfaßt. Beispielsweise begann der Review-Prozess für den Bericht der Arbeitsgruppe 1 schon im Mai 1995. Draft-Versionen der Berichte wurden den von den jeweiligen Regierungen benannten Experten zur Verfügung gestellt. Die Anmerkungen und Einwände der zwischen 500 und 700 Reviewer jeder Arbeitsgruppe aus über 70 Ländern (mit besonderem Schwergewicht auf den angelächsischen Ländern USA, Großbritannien, Kanada und Australien, aus denen allein über 50% der Reviewer stammten) sowie aus dem Regierungsreview, mußten eingearbeitet werden, bevor die Berichte dann Mitte Dezember von den Regierungsvertretern auf dem IPCC-Plenum in Rom angenommen (»accepted«) werden konnten. Man beachte die

prozeduralen Unterschiede: Während dem Synthesis-Report auf dieser Sitzung »Zeile um Zeile« zugestimmt werden mußte (wie auch den jeweiligen Summaries for Policymakers auf schon vorangegangenen Sitzungen), wobei um einige Formulierungen hart gerungen wurde, gab es eine mehr generelle Zustimmung zu den vollständigen Berichten, die eine spätere redaktionelle Bearbeitung durch die jeweiligen Autoren durchaus zuließ. Leider standen gerade diese prozeduralen Fragen und der Vorwurf einer Manipulation der Aussagen insbesondere des 8. Kapitels des 1. Bandes, in dem es um die Identifizierung eines Klimaänderungssignals und seiner möglicherweise anthropogenen Ursachen geht und das die Grundlage der im dazugehörigen Policymakers Summary zu findenden Aussage über die Anzeichen (»evidence«) eines menschlichen Einflusses auf das Klima bildet, im Mittelpunkt einer Auseinandersetzung, die von Lobbyisten, insbesondere der »fossil fuel industry« in den USA, in Gang gebracht wurde. Dabei standen weniger die Aussagen des SAR im Vordergrund als die Änderungen des Wortlautes des genannten Kapitels im Vergleich zur in Rom zur Abstimmung vorgelegten Version. Es ging nicht mehr um die Größenordnung des Klimaänderungssignals (und die Fehlerquellen bei dessen Abschätzung, die im betreffenden Kapitel ausführlich angesprochen werden), sondern um die Anzahl der geänderten Formulierungen (mit genauen Zahlenangaben) und im Grunde darum, den SAR und die darin enthaltenen Aussagen als Ganzes zu diskreditieren.

Im folgenden soll nun auf einige wichtige inhaltliche Aspekte des SAR eingegangen werden, insbesondere auf Änderungen der Aussagen und Fortschritte im Vergleich zum ersten IPCC-Assessment Report aus dem Jahr 1990.

3.1 Das Klimasystem

Die Arbeitsgruppe 1 des IPCC (Houghton et al. 1996) war für die Darstellung des aktuellen Standes der Klimaforschung zuständig und beschäftigte sich im wesentlichen mit folgenden Fragen:

- Welche Treibhausgase gibt es, und welche Wirkung haben sie auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre, in welchen Konzentrationen kommen sie in der Atmosphäre vor, und was läßt

sich über die zukünftige Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen sagen?

- Was wissen wir über das derzeitige Klima und seine räumliche und zeitliche Variabilität, ändert sich der Meeresspiegel?
- Gibt es ein anthropogenes Klimaänderungssignal?
- Was läßt sich auf der Basis von Projektionen zukünftiger Treibhausgaskonzentrationen über die zukünftige Entwicklung des Klimas und des Meeresspiegels sagen, und wie zuverlässig sind diese Prognosen?

Was den ersten Punkt angeht, so wurde er im Grunde schon sehr ausführlich im 1994 vorgelegten IPCC-Report »Climate Change 1994« (mit dem Untertitel »Radiative Forcing of Climate Change«) behandelt (Houghton et al. 1995). Hier fand sich eine grundsätzliche Überarbeitung der im ersten IPCC-Assessment Report 1990 erstmals angegebenen und im Bericht von 1992 korrigierten Werte der Treibhauspotentiale verschiedener Treibhausgase (Global Warming Potentials/GWP) im Vergleich zu CO₂. Die überarbeiteten Werte bilden die Grundlage für die Abschätzung der relativen Auswirkung von Emissionen unterschiedlicher Treibhausgase bzw. von deren Reduktionen auf das Klima.

Auch die zur Prognose der weiteren Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen benutzten Szenarien sind bereits ausführlich im IPCC-Report von 1994 behandelt worden. Schon dort fand sich, wie nun auch im SAR, die Aussage, daß eine Stabilisierung der CO₂-Konzentrationen, unabhängig vom angestrebten und als tolerierbar angesehenen Niveau, in jedem Fall eine Reduktion der Emissionen unter den heutigen Wert erfordere. Anderenfalls sei ein stetiger Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre zu erwarten.

Die Aussagen zur beobachteten Entwicklung des Klimas haben sich, was die globalen Mitteltemperaturen angeht, seit dem ersten Assessment Report nicht geändert: Es gibt eine Erwärmung der bodennahen Atmosphäre um 0,3 bis 0,6°C seit Ende des 19. Jahrhunderts, davon entfallen 0,2 bis 0,3°C auf die letzten 40 Jahre. Der größte Anteil dieser Erwärmung fällt in den Zeitraum zwischen 1910 und 1940 sowie zwischen Mitte der 1970er Jahre und heute. Die aktuelle Erwärmung findet nicht überall im gleichen Maße statt, und es gibt regional sogar Abkühlungstendenzen. Wohl aufgrund zunehmender Wolkenbedeckung haben sich zudem die Unterschiede zwischen nächtlichen Tiefsttemperaturen und

der maximalen Temperatur am Tage verringert. Allerdings sind Angaben über die Bewölkung oder aber auch über andere Klimaparameter, wie die Temperatur der freien Atmosphäre, die Niederschlagsentwicklung etc., weit weniger repräsentativ als diejenigen über die bodennahe Temperatur, für die vergleichsweise zuverlässige und vor allem lange Meßreihen vorliegen. Mit Inkonsistenzen und fehlenden Daten hat auch eine Abschätzung der Entwicklung von Extremereignissen (Stürme, Kälteeinbrüche, Hitzewellen, Dürren etc.) zu kämpfen. Hierzu wurde vom IPCC angemerkt, daß eine Zunahme von Extremereignissen im globalen Mittel nicht festgestellt werden könne, daß aber lokal durchaus Trends beobachtet werden könnten, die allerdings in beide Richtungen, also Zunahme und Abnahme der Anzahl und Heftigkeit von Extremereignissen, gingen.

Was die beobachtbaren Klimaänderungen angeht, so ist der während der letzten 150 Jahre registrierte Temperaturanstieg sicher ein deutliches Signal. Es bleibt aber immer noch die Frage offen, ob dieser Temperaturanstieg natürliche Ursachen hat und im Rahmen der natürlichen Klimavariabilität liegt oder ob die aufgrund menschlicher Aktivitäten stetig zunehmenden Konzentrationen von Treibhausgasen (insbesondere CO₂) dafür verantwortlich sind. Der Summary for Policymakers, der dem Bericht von Arbeitsgruppe 1 über den Stand des Wissens in der Klimaforschung vorangestellt ist, enthält einen nicht nur während der 2. Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention in Genf häufig zitierten Satz: »The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate«. Damit wagt man zum ersten Mal die Aussage, daß es nun möglich sei, ein anthropogenes Klimaänderungssignal aus dem Rauschen der natürlichen Klimaschwankungen herauszufiltern. Dies sei möglich geworden vor allem aufgrund neuerer Modellrechnungen mit Hilfe gekoppelter Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodelle, die die natürlichen Klimaschwankungen relativ zuverlässig abbilden können. Was allerdings vornehmlich die obige Aussage stützt, sind weitere Auswertungen, die mit Hilfe sogenannter Fingerprint-Methoden nicht nur die Entwicklung global gemittelter Parameter, sondern auch die räumliche und zeitliche Struktur des Klimaänderungssignals betrachten. Dabei wird zunächst die Bandbreite der natürlichen Variabilität mit Hilfe von Modellrechnungen oder aus paläontologischen Klimadaten ermittelt und mit der in diesem Jahrhundert be-

obachteten Entwicklung verglichen. Hierbei zeigt sich, daß die beobachteten Klimaänderungen anscheinend ihren natürlichen Rahmen verlassen haben und vieles auf einen menschlichen Einfluß hindeutet.

Auch zur Prognose des durch einen weiteren Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen zu erwartenden Klimawandels wurden Rechnungen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Zirkulationsmodellen durchgeführt, die zusätzlich zur Klimawirksamkeit der bislang schon untersuchten Treibhausgase auch die Wirkung von Aerosolen berücksichtigen. Auch deren Produktion geht nicht unwesentlich auf menschliche Aktivitäten zurück. Rechnungen für einen Mitte des letzten Jahrhunderts beginnenden Zeitraum ergaben eine recht gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Allerdings sind die dafür durchgeführten transienten, einen stetigen Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen berücksichtigenden Rechnungen mit gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen derart aufwendig und teuer, daß sie im Rahmen des SAR nur zur Kalibrierung der einfacheren, schon 1990 bzw. 1992 zur Projektion der zukünftigen Klimaentwicklung verwendeten Modelle benutzt wurden. Interessant ist, daß sich nach Meinung des IPCC seit 1990 nichts an der Bandbreite der von den Modellen berechneten »Klimasensitivität«, d.h. Temperaturerhöhung bei Verdopplung des CO₂-Gehaltes, geändert haben soll. Diese Bandbreite resultiert aus den angenommenen Modellunsicherheiten und entspricht einem Bereich von Klimasensitivitätswerten zwischen 1,5 und 4,5°C. Daraus wird ein sog. »best estimate« von 2,5°C abgeleitet, das den sich daran anschließenden Szenarienrechnungen zugrunde gelegt wird.

Die Ergebnisse dieser Projektionen beruhen auf den IS92 Emissionsszenarien, die im Bericht des IPCC von 1992 erstmalig vorgestellt und im IPCC-Bericht von 1994 einer ausführlichen Begutachtung unterzogen worden waren. Die IPCC-Szenarien IS92a bis f überspannen einen weiten Bereich von Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Bevölkerung (zwischen 6,4 und 17,6 Milliarden Menschen im Jahr 2100), der Wirtschaft, der Landwirtschaft sowie der Energieerzeugung und über den Umfang von Emissionskontrollmaßnahmen. Die anthropogenen CO₂-Emissionen werden im niedrigsten Szenario IS92c bis 2100 um 40% abnehmen, während sie im höchsten Szenario IS92e auf nahezu das 5fache der Emissionen von 1990 zunehmen werden. Dementsprechend

markieren beide Szenarios auch die Unter- und Obergrenze des Intervalls der vom IPCC im SAR angegebenen Temperatur- bzw. Meeresspiegelsteigerungen bis zum Jahr 2100. Für die Temperatur sagt der SAR aufgrund dieser Modellrechnungen Steigerungen zwischen 0,9 und 3,5°C voraus. Diese Steigerung dürfte sich über das Jahr 2100 hinaus auch bei einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre fortsetzen, denn nur zwischen 90% und 50% der zu erwartenden Änderungen werden aufgrund der Trägheit des Klimasystems bis zum Zeitpunkt dieser Stabilisierung realisiert sein. Es gibt also keinen Grund für eine Entwarnung, auch wenn sich die prognostizierten Temperaturänderungen seit Erscheinen des ersten IPCC-Assessmentreports ständig verringert haben: 1990 lag der »wahrscheinlichste« Wert einer Temperatursteigerung bis 2100 bei 3,3°C, 1992 die Prognose mit dem IS92a-Szenario bei 2,8°C und 1995 im SAR mit demselben Szenario, aber weiteren Verbesserungen der Methodik bei 2,4°C. Von ähnlichen Modifikationen war die Prognose des Meeresspiegelanstieges betroffen: 1990 lag der wahrscheinlichste Wert noch bei 66 cm bis zum Jahre 2100, 1995 gibt der SAR für das IS92a-Szenario einen Wert von 49 cm an. Der von allen Szenarien mit unterschiedlichen Klimasensitivitäten aufgespannte Bereich möglicher Meeresspiegelanstiege liegt zwischen 13 und 94 cm.

3.2 Klimafolgen

Nachdem nun ein menschlicher Einfluß auf das globale Klima immer offensichtlicher wird, bekommt auch die Frage nach den möglichen und unter Umständen negativen Wirkungen anthropogener Klimaänderungen auf Natur und menschliche Gesellschaft einen wachsenden Stellenwert. Im Mittelpunkt des von Arbeitsgruppe 2 des IPCC herausgegebenen und bearbeiteten Teils des SAR (Watson et al. 1996) steht die Frage, welche Folgen eine in Artikel 2 der Klimarahmenkonvention genannte »gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems« (»dangerous anthropogenic interference with the climate system«) haben könnte. Ziel der Klimarahmenkonvention ist ja letztendlich, eine solche Störung durch die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem noch zu spezifizierenden Niveau zu verhindern. Es geht dabei um den Erhalt natürlicher Ökosysteme, aber auch um die Ermöglichung einer

ökonomischen Weiterentwicklung (Stichwort: »sustainable development«) und die Sicherstellung der Nahrungsmittelversorgung des Menschen.

Im Bericht der Arbeitsgruppe 2 des IPCC wurde ausdrücklich nicht versucht, den Begriff einer »gefährlichen anthropogenen Störung« zu quantifizieren. Was als »gefährlich« anzusehen ist, sei letztendlich eine Frage der jeweiligen Bewertung und müsse von der Politik vorgegeben werden. Außerdem wird auf die vielen Unsicherheiten und das begrenzte Wissen über die zukünftige Entwicklung hingewiesen, ob mit oder ohne Beeinflussung durch einen anthropogenen Klimawandel. Schwierigkeiten machen vor allem die Regionalisierung der prognostizierten globalen Klimaänderungen und Aussagen über die Zu- oder Abnahme extremer Wetterereignisse. Des weiteren seien viele der betrachteten ökologischen oder auch sozioökonomischen Systeme neben klimatischen auch nicht klimabedingten Streßfaktoren ausgesetzt. Angesichts der vielen Unwägbarkeiten verwundert es nicht, daß, obwohl dieser Teil des SAR den bei weitem größten Umfang aufweist, die im Summary for Policymakers, aber auch im ausführlicheren Technical Summary zu findenden Schlußfolgerungen häufig recht vage ausfallen und manchmal den Charakter von Allgemeinplätzen haben (wie der Satz »Vulnerability increases as adaptive capacity decreases«).

Die einzelnen Kapitel dieses Bandes des SAR beschäftigen sich jeweils mit der Empfindlichkeit bestimmter natürlicher oder auch gesellschaftlicher Systeme gegenüber Klimaänderungen oder anderen Streßfaktoren. Dabei geht es um eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme: Es werden natürliche bzw. naturnahe Ökosysteme betrachtet, wie Waldökosysteme, Steppe und Tundra (»Rangelands«), Wüstenregionen, Bergregionen, Feuchtgebiete, Kryosphäre, Ozeane, Küsten und Inseln. Des weiteren werden Probleme wie Erosion und Landdegradation sowie der hydrologische Zyklus abgehandelt. Bei den sozioökonomischen Systemen geht es um klimabedingte Probleme bei Industrie, Verkehr und Energieversorgung, die Auswirkungen eines Klimawandels auf Städte und andere menschliche Siedlungen sowie auf Landwirtschaft, Wasserversorgung, Holzproduktion, Fischerei, Finanzwesen (Versicherungen) und Gesundheit.

In der Zusammenfassung, auf die hier nur kurz eingegangen werden kann, finden sich zu dieser Vielzahl von Themen folgende

Schlußfolgerungen, allerdings mit zahlreichen Konjunktiven versehen und unter häufiger Verwendung der Worte »could«, »should« und »likely«:

So könnte es zu einer Reduktion der Artenvielfalt kommen, was wiederum zu einer Verminderung des Nutzens führte, den die verschiedenen Ökosysteme dem Menschen böten. Auch wenn das Klima sich in Zukunft auf einem neuen Gleichgewichtszustand einpendelte, dürften manche Ökosysteme Jahrhunderte benötigen, um sich auf diesen neuen Zustand einzustellen. In der Umstellungsphase von Ökosystemen könnten größere Mengen an CO₂ zusätzlich freigesetzt werden, beispielsweise beim klimabedingten Übergang von einem Waldtyp zum anderen. In Wäldern dürfte sich die Primärproduktion erhöhen, der Bestand könnte sich aber trotzdem aufgrund zunehmender Gefahr durch Brände und Krankheiten vermindern. Damit verbunden ist eine Verminderung der nutzbaren Holzvorräte. Aufgrund zunehmender Temperaturen und sich nur wenig ändernder Niederschlagsmengen wird in manchen Gegenden die Desertifikation fortschreiten. Ein Drittel bis zur Hälfte der derzeitigen Gletschermasse in den Gebirgsregionen der Erde dürfte während des nächsten Jahrhunderts verschwunden sein, andererseits wird nur wenig Änderung bei den arktischen Eismassen erwartet.

Ein Anstieg des Meeresspiegels betrifft nicht nur die küstennahen Ökosysteme, sondern vor allem auch die in großer Zahl an der Küste oder auf Inseln lebenden Menschen mit ihren Siedlungen, Industrie- und Infrastruktureinrichtungen. Derzeit sind 46 Millionen Menschen dem Risiko von Sturmfluten ausgesetzt, eine Zahl, die sich bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,5 m ohne Anpassungsmaßnahmen auf das Doppelte erhöhen dürfte.

Was die Versorgung mit Wasser in ausreichender Qualität und Menge angeht, so ist dies auch heute schon in vielen Gegenden ein großes Problem. Die Lage dürfte sich aufgrund wachsender Bevölkerungszahlen, aber auch anderer nicht unbedingt mit Klimaänderungen verknüpfter Randbedingungen weiter verschärfen. Sicher über die zukünftige Entwicklung sind sich aber auch die Fachleute nicht: »Experts disagree over whether water supply systems will evolve substantially enough in the future to compensate for the anticipated negative impacts of climate change on water resources and for potential increases in demand.«

Den zweiten Schwerpunkt des 2. Teils des SAR bildet die Herausarbeitung von Möglichkeiten zur Vermeidung (»mitigation«) einer anthropogenen Klimabeeinflussung durch die Reduktion von Treibhausgasemissionen und Bereitstellung von Senken. Dabei wird im wesentlichen auf die zur Verfügung stehenden Optionen und die Möglichkeiten einer technischen Realisierung eingegangen, weniger aber auf die makroökonomischen Implikationen dieser Optionen und ihre politische Durchsetzungsfähigkeit, was Arbeitsgruppe 3 des IPCC vorbehalten blieb. In der Hauptsache geht es um Reduktionsmaßnahmen, die sich aus einem besseren Einsatz vorhandener Technologien, einer beschleunigten Entwicklung neuer Technologien und deren schnellerer Verbreitung in allen betreffenden Sektoren (insbes. Energieerzeugung, Industrie, Transport und Landwirtschaft) ergeben. Es wird darauf hingewiesen, daß die Energieversorgungssysteme bis zum Jahr 2100 mindestens zweimal ausgetauscht werden wird, wobei sich die Möglichkeit bietet, emissionsreduzierende Technologien einzusetzen. Dabei könnte der Wirkungsgrad der Stromerzeugung auf der Basis fossiler Brennstoffe vom derzeitigen globalen Mittel von 30% auf 60% angehoben werden. Eine weitere Option zur Reduktion der CO₂-Emissionen bietet der Einsatz nicht-fossiler Energiequellen, wie regenerative Energieträger oder auch Kernkraft, auf deren Akzeptanzprobleme gleichzeitig hingewiesen wird. Erstere lieferten derzeit etwa 20% der weltweit benötigten Primärenergie und könnten, langfristig gesehen, einen Großteil des Weltenergiebedarfs decken. Was die möglichen Senken angeht, so wird viel Hoffnung in die Möglichkeit gesetzt, Kohlenstoff in Wäldern zu speichern. Im SAR ist von 60 bis 90 GtC die Rede, die so in den nächsten 50 Jahren dem Kohlenstoffkreislauf entzogen werden könnten.

3.3 Die ökonomische und soziale Dimension

Arbeitsgruppe 3 des IPCC hatte die wohl schwierigste und undankbarste Aufgabe der drei Arbeitsgruppen zu bewältigen, nämlich die sozialen Wirkungen und ökonomischen Kosten möglicher Klimaänderungsfolgen und der notwendig werdenden Anpassungsmaßnahmen abzuschätzen und mit den Kosten von Vermeidungsmaßnahmen zu vergleichen. Arbeitsgruppe 3 war im November 1992 neu strukturiert worden, um »technical assessments of

the socioeconomics of impacts, adaption, and mitigation of climate change over both the short and long term and at the regional and global levels« durchführen zu können. Während die Arbeitsgruppe bis zum letzten IPCC-Report von 1994 vor allem durch die Ausarbeitung und Evaluation der IS92-Szenarien in Erscheinung trat, ist der als Teil 3 des SAR vorgelegte Bericht der erste, der sich mit allen sozioökonomischen Implikationen des anthropogenen Klimawandels befaßt und direkt auf die Probleme der politischen Entscheidungsträger eingeht (Bruce/Lee/Haites 1996). Dabei geht es auch um die Möglichkeiten der Umsetzung der in der Klimarahmenkonvention festgehaltenen Vereinbarungen, die ja nicht nur eine Reduktion der Treibhausgasemissionen fordern, sondern auch, daß die durchzuführenden Reduktionsmaßnahmen wirtschaftlich vertretbar sind und die wirtschaftliche Entwicklung der Vertragsstaaten, insbesondere der Entwicklungs- und Schwellenländer, nicht behindert wird.

In diesem Zusammenhang zu sehen ist die nicht unwichtige Aussage des SAR, daß »significant 'no regret' opportunities are available in most countries«. Als »No-regret«-Maßnahmen werden solche Maßnahmen bezeichnet, deren Kosten auch ohne Berücksichtigung möglicherweise vermiedener Schäden durch Klimaänderungen den Nutzen für die Gesellschaft nicht übersteigen. Im Anschluß an obige Aussage wird aber auch darauf hingewiesen »that the risk of aggregate net damage due to climate change, consideration of risk aversion and the precautionary principle, provide rationale for actions beyond no regrets«. Es ist zu beachten, daß diese Aussage im Summary for Policymakers der Arbeitsgruppe 3 steht und damit einem Dokument, dem von den Regierungen im oben schon beschriebenen Verfahren Zeile für Zeile zugestimmt werden mußte. Die Zusammenfassung enthält des weiteren die Schlußfolgerung, daß ein »portfolio« (ein dem Investitionswesen entlehnter Begriff) von Maßnahmen – zur Vermeidung eines Klimawandels, zur Anpassung an die Folgen eines Klimawandels sowie zur Verbesserung unseres Kenntnisstandes – einen geeigneten Weg darstelle, trotz großer Unsicherheiten handeln zu können. 13 Maßnahmen für ein solches Portfolio werden beispielhaft aufgeführt. Interessanterweise handelt es sich dabei um einen etwas anderen Mix von Maßnahmen als derjenige, der letztendlich im Synthesis Report zu finden ist.

Großen Raum im 3. Teil des SAR nimmt die Diskussion methodischer Probleme ein, so z.B. die Stärken und Schwächen verschiedener ökonomischer Modelle zur Abschätzung der Kosten von Reduktionen von Treibhausgasen. Unterschieden werden hier Top-down- und Bottom-up-Modelle. Top-down-Modelle sind hoch aggregierte makroökonomische Modelle, die in der Vergangenheit beobachtete Trends und Zusammenhänge beispielsweise zwischen Energieverbrauch und Bruttosozialprodukt in die Zukunft extrapolieren. Anders als Top-down-Modelle berücksichtigen Bottom-up-Modelle detailliert die Art und Weise des Energieverbrauchs und die Auswirkungen unterschiedlicher Technologien. Was allerdings diesen Ansätzen häufig fehlt, sind genauere Annahmen über den Nicht-Energie-Bereich und Interaktionen mit anderen Bereichen der Wirtschaft. Die Weiterentwicklung der jeweiligen Modelle hat jedoch nach Meinung des IPCC zu einer Annäherung beider Ansätze geführt. Die Anwendung von Top-down-Ansätzen auf das Problem der Kosten einer Stabilisierung der CO₂-Emissionen auf dem Niveau von 1990 ergab für die OECD-Länder Werte zwischen -0,5% bis +2% des Bruttosozialprodukts. Damit könnte es sich durchaus um eine »No-regret«-Maßnahme handeln. Zu einer ähnlichen Aussage kommt man mit Bottom-up-Ansätzen: Eine Reduktion der Emissionen um 20% während der nächsten zwei bis drei Jahrzehnte ist in den entwickelten Ländern zu vernachlässigbaren Kosten erreichbar.

Relativ neu sind die »Integrated-Assessment«-Modelle, die das Wissen der unterschiedlichsten Disziplinen durch Verknüpfungen von naturwissenschaftlichen und ökonomischen Modellen miteinander kombinieren und Rückkopplungen zulassen. Häufig ist jedoch das für ein Integrated Assessment benötigte Wissen recht rudimentär ausgeprägt, was sich natürlich auf die Qualität der betreffenden Studien auswirkt. Dennoch werden immer mehr Integrated-Assessment-Modelle zum Klimawandel entwickelt und auch angewandt, wobei zwei Kategorien unterschieden werden können: Politikbewertungsmodelle («policy evaluation models») und Modelle zur Politikoptimierung («policy optimization models»)

Große Kontroversen hat die sehr unterschiedliche Bewertung eines Menschenlebens in Industrie- und Entwicklungsländern im Kapitel über die sozialen Kosten eines Klimawandels ausgelöst. Im Summary for Policymakers wird auf diese Kontroverse noch einmal eingegangen und betont, daß ein monetäres Bewertungs-

schema nicht die Konsequenzen des Klimawandels für den Menschen verbergen dürfe. Dennoch sei festzustellen, daß in nahezu der gesamten zur Verfügung stehenden Literatur das »statistische Leben« (»statistical life«) und auch die anderen Schäden in den Entwicklungsländern niedriger bewertet würden als in den entwickelten Ländern. Eine Alternative wäre die Einführung eines globalen Mittelwertes für den Wert eines statistischen Lebens, wodurch die Summe der sozialen Kosten gleichbliebe, ihre regionale Verteilung sich aber stark zu Ungunsten der Entwicklungsländer verschieben würde. Zu einer solchen Neuverteilung der Belastung käme es natürlich auch, wenn für alle der Wert eines Lebens in den Industrienationen angenommen würde. Dies hätte eine Erhöhung der sozialen Kosten eines Klimawandels um ein Vielfaches zur Folge.

4. Probleme naturwissenschaftlicher Klima- bzw. Klimawirkungsforschung

Um die Möglichkeit und Größenordnung von Klimaänderungen abschätzen zu können, ob nun im Rahmen natürlicher Schwankungen oder verursacht durch Eingriffe des Menschen, ist ein naturwissenschaftliches Verständnis des Klimasystems unerlässlich. Aufgrund der außerordentlichen Komplexität des Klimasystems und des zum Teil sehr lückenhaften Beobachtungsmaterials gibt es jedoch eine große Anzahl von Unsicherheiten über die zukünftige Klimaentwicklung und den Einfluß des Menschen auf das globale Klima, auf die hier nun abschließend eingegangen werden soll.

Lange Zeit hat man sich bei der Untersuchung des Klimas auf die Atmosphäre beschränkt, ein in sich schon sehr komplexes und aus miteinander wechselwirkenden Prozessen bestehendes System. Abschätzungen zu Klimaänderungen müssen allerdings vielfältige Einflußgrößen im globalen Maßstab berücksichtigen. Dabei hat sich die Einordnung der atmosphärischen Prozesse in ein System miteinander wechselwirkender Subsysteme wie Ozean, Meereis, Boden und Biosphäre bewährt. Das Wissen über die einzelnen Komponenten des Klimasystems und deren Wechselwirkung sowie über die externen Einflußfaktoren (Solarkonstante, Vulkanismus) ist jeweils mit charakteristischen Unsicherheiten

behaftet. Dazu kommen noch die Unsicherheiten in bezug auf das Verhalten des Gesamtsystems. Eine zentrale Frage hierbei ist die nach der Stabilität des Klimasystem und nach der Existenz von Rückkopplungen, die den Einfluß von Störungen dämpfen oder verstärken können. Viel diskutiert wird zudem, inwieweit das Klimasystem chaotischer Natur ist und sich somit deterministischen Vorhersagen entzieht.

Zu den Unsicherheiten, die einen großen Einfluß auch auf die öffentliche Diskussion haben, zählen diejenigen, die die Entdeckung eines anthropogenen Klimaänderungssignals im derzeit beobachteten Klima betreffen. Dieses Signal ist nur zu entdecken, wenn es (meist mit Hilfe statistischer Verfahren, sog. »Fingerprint«-Methoden; z.B. Hasselmann et al. 1995) von den natürlichen Klimaschwankungen getrennt werden kann. Zur Erfassung der niederfrequenten Variabilität des Klimas werden Beobachtungsdaten über einen langen historischen Zeitraum und für den gesamten Globus benötigt. Hier liegen verlässliche Informationen im Grunde nur für die mittlere, bodennahe Temperatur der Erdatmosphäre vor. Es gibt eine große Zahl von Datenquellen (Proxies), aus denen indirekt die Temperaturen der Vergangenheit bestimmt werden können. Zudem stehen für die Lufttemperatur relativ lange Meßreihen zumindest für das Festland zur Verfügung. Für die anderen Klimaparameter gibt es dagegen im klimatologischen Maßstab nur kurze Meßreihen. Viele Klimaparameter lassen sich zudem nur schwer oder auch gar nicht auf der Basis von Proxy-Daten bestimmen. Besonders kritisch ist die Datensituation bei den neben der Erdatmosphäre im Klimasystem weiterhin zu betrachtenden Subsystemen. Hier beginnt man gerade erst im Rahmen internationaler Programme mit der flächendeckenden Beobachtung. Zwar können zur Ermittlung der Bandbreite der natürlichen Variabilität des Klimas auch Modellrechnungen herangezogen werden. Allerdings sind deren Ergebnisse stark vom augenblicklichen Kenntnisstand über vergangene Klimavariationen abhängig (abgeleitet wiederum aus den zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten). Zudem sind die Modelle nicht in der Lage, die Möglichkeit externer Einflußgrößen wie Änderungen der Solarkonstante oder des Vulkanismus vollständig zu erfassen (zu den Unsicherheiten bei den statistischen Ansätzen zur Entdeckung des anthropogenen Klimasignals siehe den äußerst erhellenden Aufsatz von Hegerl und North von 1995).

Was den Einfluß des Menschen auf das globale Klima angeht, so ist dieser also zunächst nur aufgrund von Modellrechnungen nachzuvollziehen. Hierin steckt eine der Hauptunsicherheiten der aktuellen Klimadebatte: die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse dieser Modellrechnungen insbesondere bei der Prognose von Klimaänderungen durch einen anthropogen verstärkten Treibhauseffekt. Unbestritten ist der »natürliche« Treibhauseffekt in der Atmosphäre. Mit Unsicherheiten behaftet ist dabei jedoch das Ausmaß der durch eine Zunahme von Treibhausgasen verursachten und durch gegenseitige Beeinflussung oder Rückkopplungseffekte abgeschwächten bzw. verstärkten Änderungen in der Strahlungsbilanz der Atmosphäre und letztendlich deren Auswirkungen auf das Klima selbst. Unsicher ist darüber hinaus die Dauer des Verbleibs der Treibhausgase in der Atmosphäre, die Existenz natürlicher Quellen und Senken sowie die Sekundärproduktion treibhausaktiver Substanzen. Auch kann die Wirksamkeit natürlicher Quellen und Senken Schwankungen unterworfen sein, was zusammen mit den Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung anthropogener Treibhausgasemissionen Prognosen von Klimaänderungen erschwert.

Trotz der genannten Unsicherheiten gibt es inzwischen Modellrechnungen, die den Verlauf der globalen Temperaturverhältnisse etwa seit Beginn der industriellen Revolution leidlich gut nachzuvollziehen vermögen (siehe dazu Abschnitt 3.1). Dies gibt Anlaß zur Hoffnung, daß sie sich auch zur Prognose anthropogen veränderten Klimas eignen. Allerdings gibt es auch in den verwendeten sehr aufwendigen und rechenzeitintensiven gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen eine Vielzahl von Näherungen, Vernachlässigungen und numerisch bedingten Fehlerquellen, ganz abgesehen von den oben angedeuteten generellen Unsicherheiten beim Verständnis des Klimasystems. Dies, zusammen mit den Schwierigkeiten, die Prognosegüte ähnlich wie bei Wettervorhersagemodellen im Vergleich mit einem tatsächlich eingetretenen Klima zu überprüfen (Ansätze dazu sind wegen des betrachteten Zeithorizonts notwendigerweise retrospektiv), macht es unmöglich, Sicherheitsmargen für Klimaprognosen anzugeben. Ein gewisses Maß für die Richtigkeit der prognostizierten anthropogenen Erwärmungstrends liefert allein die Betrachtung der Bandbreite von Ergebnissen unterschiedlicher Modellstudien, die allerdings alle von

ähnlichen Voraussetzungen ausgehen und einen gemeinsamen Kenntnisstand repräsentieren.

Noch weit mehr Schwierigkeiten als die Modellierung bzw. Prognose der globalen Temperaturverhältnisse macht die Berechnung regionaler Temperaturänderungen. Einerseits sind die Modelle nicht in der Lage, die recht uneinheitliche Verteilung von Erwärmungs- und Abkühlungstrends auf der Erde genau zu reproduzieren, und andererseits ist die Datenlage in manchen Regionen sehr dünn und kann nur bedingt zu einem Vergleich zwischen Rechnung und Messung herangezogen werden. Damit bleiben große Unsicherheiten bestehen, auch wenn durch einigen zusätzlichen Aufwand (bspw. durch Modell-Nesting oder statistische Verfahren auf der Basis von vorhandenen Beobachtungen) ein »Downscaling« durchgeführt wird. Im übrigen kann die Berücksichtigung regionaler Faktoren, etwa durch bessere Beachtung der Orographie, oder aber auch von regional wirksamen anthropogenen Einflüssen, wie der Entwicklung der Aerosolkonzentrationen, die vom globalen Modell prognostizierte Klimaentwicklung für die betrachtete Region konterkarieren. Große Unsicherheiten sind darüber hinaus bei der Verwendung anderer Klimaparameter als der Temperatur zu erwarten. Die verlässlichsten Parameter sind immer noch »Standardgrößen« wie Luftdruck, Temperatur und Windgeschwindigkeit. Die Prognose von Niederschlag, Bodenfeuchte, aber auch der Häufigkeit von Extremereignissen (Stürmen) ist von erheblichen Unsicherheiten begleitet.

Aus dem bislang über die Unsicherheiten in der Klimafor schung Gesagten dürfte klar werden, daß man sich bei der Entwicklung von Konzepten zur Untersuchung von Wirkungen anthropogener Klimaänderungen mit zwei grundlegenden Problemen konfrontiert sieht:

1. Ein anthropogenes Klimaänderungssignal ist bislang noch nicht mit Sicherheit zu identifizieren. Daher sind auch in der Natur (oder Gesellschaft) keine Änderungen beobachtbar, die eindeutig auf anthropogenen Klimaänderungen zurückgeführt werden könnten.
2. Der Einfluß des Menschen auf das Klima ist nur in Form von Modellrechnungen nachgewiesen. Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen sind mit Unsicherheiten behaftet, was besonders für die Prognose regionaler Klimaänderungen zutrifft.

Die (naturwissenschaftliche) Klimawirkungsforschung hat auf diese Weise ihren Ursprung weniger in der Beobachtung von schon eingetretenen Wirkungen anthropogener Klimaänderungen in der Natur, als vielmehr in der Befürchtung, daß solche eintreten und »volkswirtschaftlichen Schaden« anrichten könnten bzw. daß »kostbare Naturgüter« verloren gehen könnten. Damit orientiert sich auch die Initialisierung naturwissenschaftlicher Klimafolgenforschung eher an möglichen gesellschaftlichen Folgen und den Aufgaben der Politik(er), hier vorzusorgen bzw. schon eingetretenen Schaden zu begrenzen.

Aufgrund der Unsicherheiten, die den Aussagen der Klimaforschung anhaften, ist schon die Auswahl von Forschungsgegenständen für die Klimawirkungsforschung schwierig. Die Beschränkung auf bestimmte Regionen reduziert zwar die untersuchbaren Problemfelder auf die für die Region typischen, aber eine Betrachtung entsprechender Forschungsprogramme zeigt, daß dort häufig solche Forschungsthemen aufgeführt sind, mit denen man sich auch ohne Vorgabe einer anstehenden Klimaproblematik erkenntnisgewinnend beschäftigen könnte.

Auch wenn es sicherlich sog. sensible Bereiche gibt (ob nun im geographischen Sinne oder sektoral verstanden), die auf mögliche Klimaänderungen stärker reagieren als andere, so ist gerade in Anbetracht der Unsicherheiten von Klimaprognosen das ganze Gefüge von Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Bereichen und zusätzlich noch möglicher direkter anthropogener Einflußnahme zu betrachten. Dies gilt nicht nur in Beschränkung auf ein bestimmtes Gebiet, sondern auch für die Einbettung dieser Region in einen überregionalen, wenn nicht globalen Zusammenhang.

Es ist schwer, in Bezug auf die Klimawirkungsforschung von spezifischen Unsicherheiten zu sprechen, dazu ist das Problemfeld einfach zu heterogen und zu wenig umrissen (was quasi eine der Grundunsicherheiten darstellt). Zudem sollte es eine der Aufgaben der Klimawirkungsforschung sein, Unsicherheiten zu identifizieren und, wenn möglich, zu reduzieren.

Ähnlich wie bei der naturwissenschaftlichen Klimawirkungsforschung leidet auch die Begründung einer *sozialwissenschaftlichen Klimawirkungsforschung* unter dem Dilemma, daß ein globaler anthropogener Einfluß auf das Klima bislang nur aufgrund von Modellrechnungen vermutet wird, aber noch nicht eindeutig in Beobachtungsdaten wiederzufinden ist. Allerdings reagiert die Ge-

sellschaft schon jetzt, ganz anders als »natürliche« Systeme, auf einen antizipierten Klimawandel in Form internationaler Verhandlungen zum Klimaschutz, durch Überlegungen zu einem allgemeinen Wertewandel, aber eben auch durch die Förderung von Programmen zur Klima- und Klimawirkungsforschung. Die Möglichkeit des Menschen, in Vorwegnahme angekündigter Ereignisse zu handeln und Vorsorgemaßnahmen einzuleiten, macht den Forschungsgegenstand von der Verkündung und Aufnahme seiner Forschungsergebnisse abhängig und damit Prognosen schwierig oder gar unmöglich. Dies gilt ganz besonders für das hier behandelte Problemfeld, weil die vorliegenden Prognosen über einen zu erwartenden Klimawandel mit großen Unsicherheiten behaftet sind und somit auch die gesellschaftlichen Reaktionen eine große Schwankungsbreite aufweisen können, von einem Verdrängen des Problems bis hin zu einem übertriebenen Aktionismus.

Literatur

- Ångström, A. (1928):
Energiezufuhr und Temperatur auf verschiedenen Breitengraden. Gerlands Beiträge zur Geophysik 15, S. 1-13
- Arrhenius, S. A. (1903):
Lehrbuch der kosmischen Physik, Zweiter Teil. Leipzig
- Bourke, W. (1974):
A multi-level spectral model. I. Formulation and hemispheric integration. Mon. Wea. Rev. 102, S. 687-701
- Budyko, M. I. (1969):
The effect of solar radiation variations on the climate of the earth Tellus, 21, S. 611-619
- Bruce, J. P. (1991):
The world climate programme. achievements and challenges, in: Jäger, J.; Ferguson, H. L.: climate change: science, impact and policy. Cambridge 1991. S. 149-155
- Bruce, J.P.; Lee, H. H.L.; Haites, E.F. (Ed.) (1996):
Climate change 1995: Economic and social dimensions of climate change. Cambridge
- Callendar, G. S (1938):
The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. Quart. J. R. Met. Soc., 64, S. 223-241
- Callender, G. S. (1961):
Temperature fluctuations and trends over the earth. Quart. J. R. Met. Soc. 87, pp. 1-12

- Cooley, J. W.; Tukey, J. W. (1965):
An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. of Comput.* 19, S. 297-301
- Edelmann, W. (1986):
Die Entwicklung der operationellen numerischen Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst. *Promet* 16, Heft 4, S. 21-25
- Flohn, H. (1963):
Theories of climatic change from the viewpoint of the global energy budget, in: UNESCO: Changes of climate. Proc. of the Rome Symposium organized by Unesco and the World Meteorological Organization
- Gates, W. L. (1988):
Climate and the climate system, in: Schlesinger, M. E.: Physically-based modelling and simulation of climate and climatic change Part 1, NATO ASI Series C, Vol. 243
- Golitsyn, G. S. (1983):
Almost empirical approaches to the problem of climate, its variations and fluctuations, in: Saltzman, B.: Theory of climate. New York
- Hasselmann, K. et al. (1995):
Detection of anthropogenic climate change using a fingerprint method. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 168. Hamburg
- Hecht, A. D.; Tirpak, D. (1995):
Framework agreement on climate change: A scientific and policy history. *Climate Change* 29, S. 371-402
- Hegerl, G.; North, C. G. R. (1995):
Statistically optimal approaches to detecting anthropogenic climate change. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 167. Hamburg
- Houghton, J. T. ; Jenkins, G. J.; Ephraums (Eds.) (1990):
Climate change: The IPCC scientific assessment. Cambridge
- Houghton, J. T. et al. (Eds.) (1995):
Climate Change 1994. Cambridge University Press. Cambridge
- Houghton, J. T. et al. (Eds.) (1996):
Climate change 1995: The science of climate change. Cambridge
- Kaplan, L. D. (1960):
The influence of carbon dioxide variations on the atmospheric heat balance. *Tellus* 12, S. 204-208
- Kellogg, W. W. (1977):
Effects of human activities on global change. A summary, with consideration of the implications of a possible warmer earth. WMO 486, Techn. Note 156. Genf
- Kellogg, W. W. (1987):
Mankind's impact on climate: The evolution of an awareness. *Climatic Change* 10, S. 113-136
- Landsberg, H. E. (1974):
Man-made climatic changes, in: WMO: Physical and dynamic climatology. Leningrad, WMO No 347, S. 262-303

- Manabe, S.; Wetherald, R. T. (1967):
Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.* 24, S. 241-259
- Manabe, S.; Wetherald, R. T. (1975):
The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.* 32, S. 3-15
- Milankovic, M. (1930):
Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. Berlin
- Möller, F. (1963):
On the influence of changes in the CO₂ concentration in air on the radiation balance of the earth's surface and on the climate. *J. Geophys. Res.* 68, 13, S. 3877-3886
- von Neumann, J. (1960):
Some remarks on the problem of forecasting climate fluctuations, in: Pfeffer, R. L.: *Dynamics of climate.* Oxford, S. 9-11
- North, G. R. (1988):
Lessons from Energy balance models, in: Schlesinger, M. E. (Ed.): *Physically based modelling and simulation of climate and climatic change- Part II,* S. 627-651
- Phillips, N. A. (1960):
The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment, in: Pfeffer, R. L.: *Dynamics of climate.* Oxford, S. 18-25
- Plass, G. N. (1956):
The carbon dioxide theory of climatic change. *Tellus*, S. 140-154
- Plass, G. N. (1959):
carbon dioxide and climate. *scientific american*, S. 41-47
- Plass, G. N.; Kaplan, L. D. (1961):
Letter und Reply zu 'The influence of carbon dioxide variations...*', (*Tellus* 12.1960, S. 204-208). *Tellus* 13, S. 296-302
- Revelle, R.; Suess, H. E. (1957):
Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during past and present decades. *Tellus* 9, S. 18-27
- Robert, A. J. (1966):
The integration of a low-order spectral form of the primitive meteorological equations. *J. Meteor. Soc. Japan* 44, S. 237-245
- Scherhag, R. (1939):
Die Erwärmung des Polargebietes. *Ann. Hydr.*, S. 57-67
- Schlesinger, M. E. (1988):
Quantitative analysis of feedbacks in climate model simulations of CO₂-induced warming, in: Schlesinger, M. E. (Ed.): *Physically based modelling and simulation of climate and climatic change- Part II,* S. 627-651
- Sellers, W. D. (1969):
A global climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. *J. Appl. Meteor* 8, S. 392-400

- Smagorinsky, J. (1974):**
 Global atmospheric modeling and the numerical simulation of climate, in:
 Hess, W. N.: Weather and climate modification. New York, S. 632-686
- Smagorinsky, J. (1983):**
 The beginnings of numerical weather prediction and general circulation modeling: Early recollections, in: Saltzman, B.: Theory of climate. New York S. 3-37
- Süßenberger, E. (1943):**
 Die Bedeutung des Ozons und der Kohlensäure in der Atmosphäre für die nächtliche effektive Ausstrahlung am Erdboden. Ann. Hydr., S. 222-226
- Thompson, P. D. (1961):**
 Numerical weather analysis and prediction. New York
- Watson, R.T. et al. (Eds.) (1996):**
 Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change. Cambridge
- Williams, J. (1978):**
 Carbon dioxide, climate and society. Oxford
- Winkler, C. (1883):**
 Wirkt die in unserem Zeitalter stattfindende Massenverbrennung von Steinkohle verändernd auf die Beschaffenheit der Atmosphäre. Vortrag, gehalten beim Zweiten Allgemeinen Deutschen Bergmannstage in Dresden 1883. Reprint-Ausgabe in: VDI-Kommission Reinhaltung der Luft: Waldsterben im 19. Jahrhundert. Düsseldorf 1985
- WMO (1966):**
 Climatic change. Report of a working group of the commission for climatology. WMO Techn. Note 79, WMO No 195.TP.100
- WMO (1975):**
 Proc. of the WMO/IAMAP symposium on long-term climate fluctuations. WMO No 421