

Klima im Blickpunkt Einige grundlegende Informationen

Christian-D. Schönwiese

Was ist eigentlich Klima?

Das erste, was zum *Klima* wissen sollte, ist, daß es sich vom *Wetter* wesentlich unterscheidet. Im Gegensatz zum Wetter, das in der zeitlichen Größenordnung von Stunden bis Tagen definiert ist (maximal ca. 2 Wochen, was der theoretischen oberen Grenze der Wettervorhersagbarkeit entspricht), wird Klima stets in längeren Zeitspannen betrachtet, nach den Empfehlungen der Weltmeteorologischen Organisation (WMO, Fachorganisation der UN) mindestens 30 Jahre, weitergehend dann Jahrhunderte, Jahrtausende usw. bis hin zu Jahrmilliarden. Diese *zeitliche Differenzierung* ist deswegen wichtig, weil die Ursache-Wirkung-Mechanismen je nach zeitlicher Größenordnung ganz unterschiedlich sind. So hat beispielsweise das Entstehen und Vergehen einer Wolke (charakteristische Zeit, d.h. Lebensdauer, einige Stunden, somit ?Wetter?) ganz andere Ursachen als das Kommen und Gehen der ?Eiszeiten? (charakteristische Zyklus-Zeit um 100 000 Jahre, somit ?Klima?). Das Kohlendioxid der Atmosphäre, um ein anderes Beispiel zu nennen, geht in kein Modell der Wettervorhersage ein, weil es dort keine Rolle spielt, wohl aber und sogar sehr wesentlich in Klimamodelle.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen Wetter und Klima besteht darin, daß die über viele Jahre und häufig auch räumlich integrierten Daten der *Klimaelemente* (Temperatur, Niederschlag, Feuchte, Bewölkung, Wind usw.) meist ein viel geringeres *Schwankungsausmaß* aufweisen als das der entsprechenden *Wetterelemente* (obwohl es sich, physikalisch gesehen, um die gleichen Meßgrößen handelt). Trotzdem können gerade die scheinbar geringen *Klimatrends* sehr folgenswer sein, wie uns das Beispiel der Gebirgsgletscher zeigt: Diese reagieren kaum auf die Launen des Wetters, jedoch hochempfindlich auf Temperaturtrends selbst von nur wenigen Zehntelgrad, falls diese mindestens einige Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte anhalten und somit ?Klima?-Trends sind. Beispielsweise haben die Alpengletscher seit ca. 1850 ungefähr die Hälfte ihres Volumens verloren, was weitgehend (aber nicht ausschließlich, da auch der Niederschlag und die jahreszeitliche Ausprägung der Klimaelemente Einfluß nehmen) auf einen – hinter den viel heftigeren Wetteränderungen geradezu versteckten – systematischen Erwärmungstrend von etwa 0,5 °C zurückgeführt wird.

Die *Grundfragen der Klimatologie*, die hier nun kurz vorgestellt werden sollen, lauten:

- •Woher kommen die Klimainformationen (Klimadaten)?
- •Wie sieht das Bild der natürlichen Variationen des globalen (Weltklimas) bzw. regionalen Klimas aus, das sich aus der Analyse dieser Daten ergibt?
- •Welche Ursachen sind für diese Variationen verantwortlich?
- •Inwieweit greift der Mensch in das Klimageschehen ein?
- •Besteht eine Notwendigkeit zu Klimaschutzmaßnahmen?

Bedauerlicherweise unterscheidet sich die *öffentliche Klimadiskussion* nur allzu häufig von der *wissenschaftlichen*. Über- bzw. Untertreibungen bis hin zu den völlig unwissenschaftlichen Extrempositionen der ?Klimakatastrophe? bzw. des ?Klimaschwindels? sind denkbar unangebracht und richten mehr Schaden an, als sie nutzen. Ein weiterer, in den Medien anscheinend nur schwer vermeidbarer Fehler ist die allzu bruchstückhafte Behandlung von aus dem Zusammenhang gerissenen Forschungsergebnissen, beispielsweise das ?Hochspielen? von nur einem Klimafaktor. In dieser Situation kommt dem Wissenschaftler eine besondere Verantwortung zu: Nicht nur intensive Forschung, um die Wissenschaft voranzubringen, sondern auch - trotz aller Vielfältigkeit und Komplexität der Klimaproblematik - dies auch der Öffentlichkeit möglichst verständlich und transparent nahezubringen. Geeignete Literatur dazu existiert durchaus (vgl. Hinweise am Ende dieses Textes).

Das ?Ozonloch?, d.h. der regional (insbesondere Antarktis, aber auch Arktis/Subpolarzone der Nordhalbkugel) sowie jahreszeitlich (jeweiliges Frühjahr) begrenzte Rückgang der Ozonkonzentration der Stratosphäre, ist kein Klima-, sondern ein luftchemischer Vorgang, der somit auch nicht oder kaum die Temperatur, den Niederschlag usw. der unteren

Atmosphäre verändert, wohl aber sehr ernst zu nehmende biologische Auswirkungen hat. Dieser Problemkreis wird hier ebenso wenig behandelt wie der ganze Komplex der *Schadstoffe* in Luft, Wasser und Boden. Trotz diverser Querverbindungen zwischen diesen und anderen Problemkreisen geht es im weiteren also allein um das Klima (im engeren Sinn).

Woher kommen die Klimainformationen?

Am verlässlichsten sind *direkte Meßdaten der Klimaelemente* (Arbeitsbereich der *Neoklimatologie*), die aber in kontinuierlicher Form nur bis maximal 1659 (Temperatur im zentralen England in Form von Monatsmittelwerten) zurückreichen, global annähernd flächendeckend sogar nur bis ca. 1850/1860. Es gibt aber auch eine Vielzahl *historischer Befunde* (z.B. über Sturmfluten, Flußpegelstände, Gemälde von Alpengletschern, Höhlenmalereien usw., die maximal die letzten ca. 5000 Jahre umfassen, allerdings nicht immer quantitativ und häufig klimatologisch schwer interpretierbar sind). Von großer Bedeutung sind darüber hinaus aber die vielen *indirekten Rekonstruktionstechniken der Paläoklimatologie*, die uns die gewaltige Zeitspanne bis maximal 3,8 Milliarden Jahre zurück erschließen (Erdalter ca. 4,6 Milliarden Jahre). Besonders genau sind dabei u.a. die Methoden der Dendroklimatologie (Klima-Rekonstruktionen aus Baumwuchsdaten, Reichweite max. ca. 10 000 Jahre), der Bohrungen im polaren Eis (insbesondere Sauerstoff-Isotopenmethode zur Temperaturrekonstruktion, Reichweite max. ca. 200 000 Jahre) und der Bohrungen in Tiefsee-Sedimenten (Reichweite max. ca. 100 Millionen Jahre).

Auch Daten, die Aufschluß über mögliche *Ursachen* von Klimavariationen geben, sind in großer Zahl verfügbar, und zwar wiederum aufgrund direkter Messungen sowie indirekter Rekonstruktionen. So erlauben beispielsweise die polaren Eisbohrungen auch Rückschlüsse auf die frühere Vulkantätigkeit der Erde sowie über die Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre (dies insbesondere hinsichtlich Kohlendioxid und Methan). Andere wichtige Größen wie beispielsweise Veränderungen der Sonnenausstrahlung durch Vorgänge auf der Sonne (Sonnenaktivität), die - wenn sie von atmosphärischen Einflüssen frei sein sollen, von Satelliten aus gemessen werden müssen - sind nur für die letzten Jahrzehnte (nach den im Weltstrahlungszentrum zusammengetragenen Daten seit 1978) verfügbar, auch wenn es mehrere Versuche gibt, diese Größe anhand der sog. Sonnenflecken-Relativzahlen bis ins 17. Jahrhundert zurück zu rekonstruieren (und Paläomethoden noch weiter zurückzuführen).

Bei den derzeitigen *Meßnetzen*, die klimatologisch von der Weltmeteorologischen Organisation (WMO) koordiniert und von den nationalen Wetterdiensten unterhalten werden (in Deutschland Deutscher Wetterdienst (DWD); weltweit bodennahe Messungen derzeit knapp 10 000 Stationen, mit Hilfe von Radiosonden bis ca. 15 km Höhe knapp 1000 Stationen), besteht eine enge Verbindung zur Umweltüberwachung. So existiert beispielsweise ein rund 40 Stationen - von der Arktis über die Tropen (Mauna Loa, Hawaii) bis zum Südpol - umfassendes Netz, das u.a. auch der Messung der atmosphärischen Kohlendioxid-Konzentration dient. In Deutschland ist für derartige Messungen das Umweltbundesamt (UBA) zuständig. (Um 1850 gab es erst rund 300 Stationen zur Messung der bodennahen Klimaelemente, 1781-1795 im Rahmen der Societas Meteorologica Palatina (Meteorologische Gesellschaft der Pfalz), die das erste internationale Meßnetz von Nordamerika über Europa bis zum Ural eingerichtet hat, knapp 40 Stationen).

Natürliche Variationen des Weltklimas

Das sich aus den direkt und indirekt gewonnenen Klimadaten ergebende Bild der natürlichen Variationen des Weltklima ist überaus vielfältig und kompliziert. Im globalen Mittel lassen sich nach einer sehr warmen, völlig eisfreien Frühphase der ersten beiden Milliarden Jahre der Erdgeschichte eine Reihe von jeweils einige Jahrmillionen andauernden kälteren Klimaepochen ausmachen, die Eisvorkommen auf der Erdoberfläche zugelassen haben. In einer solchen Epoche, nämlich dem *?Quartären Eiszeitalter?* (seit ca. 2 Jahrmillionen) leben wir. Innerhalb dieser *?Eiszeitalter?* gibt es relativ kältere Epochen, die *Kaltzeiten* oder eigentlichen *?Eiszeiten?* (zuletzt die *Würm-?Eiszeit?* bis ca. 11 000 Jahre vor heute), und wärmere Epochen, die *Warmzeiten*, derzeit die *Neo-Warmzeit* (auch Postglazial oder *Holozän* genannt), die übrigens durch eine im Vergleich mit der Klimageschichte bemerkenswerte *Stabilität* der Temperaturbedingungen ausgezeichnet ist, was für die

kulturelle Entwicklung der Menschheit sicherlich sehr förderlich war. Frühere *abrupte Klimaänderungen*, wie beispielsweise die sog. Jüngere Dryaszeit, als beim Übergang von der letzten Kaltzeit zur Neo-Warmzeit, zwischen 11000 und 10000 Jahren vor heute innerhalb von Jahrzehnten das schon erreichte Warmklima vorübergehend in ein ?Eiszeit?-Klima umgeschlagen ist, sind zumindest in den letzten ca. 6000-7000 Jahren nicht mehr aufgetreten.

Trotzdem hat es auch in den letzten Jahrtausenden und Jahrhunderten Klimavariationen aufgetreten, die man nicht unterschätzen sollte, obwohl sie im globalen Mittel und langfristig gesehen nur Temperaturvariationen von etwa 1-1,5 Grad um den globalen Mittelwert von + 15 °C ausgemacht haben – im Gegensatz zu etwa 4 - 6 °C Temperaturunterschied zwischen einer ?Eis?- und Warmzeit (wiederum im globalen Mittel). So war es beispielsweise vor rund 1000 Jahren, zur Zeit der *Mittelalterlichen Warmphase*, regional etwas wärmer als heute, in der sog. ?*Kleinen Eiszeit?* (zwischen ca. 1400 und 1900) dagegen fluktuativ kälter. *In den letzten rund 100 Jahren hat sich der Globus um rund 0,5 °C erwärmt*, allerdings alles andere als gleichmäßig, wie man dank der sehr vielen und für diese Zeit besonders verlässlichen Klimadaten weiß: Zeitlich gesehen war dieser Trend nämlich von diversen *Fluktuationen* und *Kurzfristanomalien* überlagert und räumlich gesehen sind selbst die Langfristtrends sehr unterschiedlich, wobei es beispielsweise trotz globaler Erwärmung auch *jahreszeitlich-regional begrenzte Abkühlungstrends* gibt.

Leider sind die Erkenntnisse über andere Klimatelemente sehr viel unsicherer, selbst was die jüngere Zeit betrifft. Beim *Niederschlag* ist in den letzten 100 Jahren jedoch beispielsweise im Mittelmeergebiet ein deutlicher Rückgang der Winter-niederschläge eingetreten (im Sommer fällt dort sowieso sehr wenig Niederschlag); in Deutschland sind für diese Zeit Trends zu mehr Winter- (sehr ausgeprägt) und weniger Sommerniederschlag (weniger ausgeprägt) erkennbar, alles aber von ausgeprägten Fluktuationen und Extremereignissen überlagert, so daß diese Trends nur mit einigem mathematisch-statistischem Aufwand aufgedeckt werden können. Die Erkenntnisse über den *Wind* sind noch unsicherer, die Frage nach einer systematischen Zu- oder Abnahme extremer Wettersituationen nicht eindeutig beantwortbar. (Übrigens: Während der Unterschied zwischen Wetter und Klima nach wie vor gilt, ist die Frage nach einer Häufigkeitsänderung bestimmter Wettersituationen über die Jahrzehnte usw. hinweg durchaus klimatologisch.) Trotz dieser Unsicherheiten gibt es aber in der Versicherungswirtschaft ernst zu nehmende Hinweise auf eine drastische Zunahme von ?Naturkatastrophen? (Stürme, Überschwemmungen u.ä.) in den letzten Jahrzehnten.

Ursachen natürlicher Klimavariationen

Die Frage nach den Ursachen der schier unübersehbaren Vielfalt der beobachteten bzw. rekonstruierten Klimavariationen der Vergangenheit ist nicht weniger vielfältig als diese Daten selbst. Zudem verstecken sich dahinter die wegen ihrer Vernetzungen und Rückkopplungen – die nur zum Teil verstanden sind – äußerst komplizierten *Klimasteuerungsmechanismen*. Grob gesagt sind alle Vorgänge klimawirksam, die entweder die *Energetik* des Systems Erdoberfläche-Atmosphäre (sog. externe Antriebe) oder die *Zirkulation* von Atmosphäre bzw. Ozean (sog. interne Mechanismen) verändern, wobei die externen Antriebe stets auch auf die Zirkulation Einfluß nehmen. Stellvertretend für vieles seien beispielhaft genannt:

- Die Parameter der *Erdumlaufbahn um die Sonne* (Exzentrizität, Erdachsen-neigung u.a.) variieren in Zykluszeiten zwischen rund 20 000 und 100 000 Jahren, was indirekt die Sonneneinstrahlung verändert und über komplizierte Rückkopplungen mit der Kryosphäre (Meer- und insbesondere Landeis) als primäre Ursache für das Kommen und Gehen der ?Eiszeiten? gilt. Entsprechend spezialisierte Klimamodelle sagen den Tiefpunkt der kommenden ?Eiszeit? übrigens in etwa 60 000 Jahren (erste eiszeitähnliche Gegebenheiten aber schon in einigen Jahrtausenden) vorher. Der entsprechende Temperaturtrend liegt aber bei nur 0,01 °C pro Jahrhundert und ist somit für die nächsten Jahrhunderte ohne Belang.
- Aufgrund von Satellitenmessungen ist bekannt, daß aufgrund der sog. *Sonnenaktivität* die direkte Sonnenausstrahlung im Promillebereich schwankt, und zwar parallel zum quasi-11-jährigen Sonnenfleckenzyklus. Stärkere Einflüsse in Verbindung mit längerfristigen solaren Zyklen (z.B. ca. 75-80-jähriger Zyklus, ca. 200-jähriger Zyklus

usw.) sind wahrscheinlich deutlich wirksamer, betreffen aber eher die paläoklimatologische Zeitskala.

- Explosive *Vulkanausbrüche* schleudern Gase und Partikel in die Stratosphäre, wobei vor allem die dort durch Gas-Partikel-Umwandlungen entstehenden Sulfatpartikel klimawirksam sind: Sie absorbieren und streuen einen Teil der Sonneneinstrahlung, was stratosphärische Erwärmungen simultan mit Abkühlungen der unteren Atmosphäre (wegen der dann geringeren Transmission von Sonneneinstrahlung dorthin) hervorruft.
- Ozeanisch-atmosphärische Wechselwirkungsvorgänge, wie sie sich beispielsweise im *El-Niño-Phänomen* äußern, sind ebenfalls klimawirksam, da die dadurch hervorgerufenen episodischen (Zyklus ca. 3 - 8 Jahre) Erwärmungen der tropischen Ozeane, insbesondere des tropischen Pazifiks vor der Küste von Peru, auch weltweit ?durchschlagen?, obwohl die spektakulärsten Auswirkungen von El-Niño-Ereignissen tropische Niederschlagsanomalien sind. Ein weiterer, in diesem Fall rein atmosphärischer Vorgang ist die sog. *Nordatlantik-Oszillation*, eine Art Luftdruckschaukel, die für Europa besondere Bedeutung hat.

Bei diesen letztgenannten Phänomenen handelt es sich offenbar, im Gegensatz zu den davor skizzierten, nicht um externe Antriebe, sondern um interne Mechanismen des *Klimasystems*, das sich insgesamt aus den Komponenten Atmosphäre-Hydrosphäre (Ozean und Süßwasser der Landgebiete), Kryosphäre (Land- und Meereis), Pedo-/Lithosphäre (Boden und Gesteine, insgesamt ?feste? Erde) und Biosphäre (insbesondere Vegetation) zusammensetzt.

Für alle diese ursächlichen Problemkreise gibt es spezielle *Klimamodellrechnungen*, die ein weitgehendes Verständnis der Ursache-Wirkung-Beziehungen zulassen. Dabei besteht jedoch die Schwierigkeit, daß bei dem eigentlich notwendigen Aufwand, wie er in umfassenden gekoppelten *Zirkulationsmodellen* von Atmosphäre und Ozean realisiert ist (general circulation models, GCM) - was pro Simulation zu Rechenzeiten von bis zu mehreren Monaten an den größten EDV-Anlagen der Welt führt - meist jeweils nur einer der oben aufgelisteten ursächlichen Klimamechanismen in die Berechnungen eingehen kann. Daher sind neben diesen aufwendigen (GCM-) auch *vereinfachte physikalische bzw. statistische Modelle* entwickelt und angewendet worden (z.B. Energiebilanzmodelle oder, bei statistischer Methodik, neuronale Netze), mit deren Hilfe das Problem der *multiplen Klimasteuerung* angegangen wird. Dies wird allerdings mit einer weiteren Vereinfachung gegenüber der Wirklichkeit erkauft, die sich immer in quantitativen Unschärfen sowie begrenzter räumlich-zeitlicher Auflösung äußert (im Extremfall ist dabei die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur das einzige Klimatelement). Wegen der verschiedenen Schwächen bzw. Stärken solcher Berechnungen ist es daher wichtig, alternative Konzepte einzusetzen und anhand der Beobachtungsdaten zu verifizieren (falls es sich nicht um empirisch-statistische Modelle handelt), wenn die Ergebnisse und deren Interpretation tragfähig sein sollen.

Klimafaktor Mensch

Waldrodungen in historischer Zeit, das regionale ?*Stadtklima*? und insbesondere die *Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre durch direkte Emissionen* aufgrund menschliche Aktivitäten sind Beispiele für das Auftreten des Klimafaktors Mensch und somit für anthropogene Klimaänderungen. Dabei kann es keinen Zweifel darüber geben, daß solche Einflüsse bestehen; die Frage ist allein: Wie wirken sie sich quantitativ sowie regional-jahreszeitlich aus, und dies in Vergangenheit und Zukunft, und in welcher Beziehung stehen sie zu natürlichen Klimavariationen.

Am wichtigsten, und zwar sowohl quantitativ als auch hinsichtlich der globalen Reichweite, sind die anthropogenen Änderungen der Zusammensetzung der Erdatmosphäre. Dabei gibt es zwei einander entgegengesetzte Vorgänge:

- die Anreicherung der unteren Atmosphäre mit *Sulfatpartikeln (Sulfataerosol)*, die aus der anthropogenen Schwefeldioxid-Emission stammen und - global gemittelt - eine Abkühlung der unteren Atmosphäre bewirken (*anthropogener Kühleffekt*);
- die zusätzliche (z.B. Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Ozon (O₃) der unteren Atmosphäre) bzw. neuartige (Fluorchlorkohlenwasser-stoffe, FCKW)

anthropogene Emission *klimawirksamer Spurengase*, die global gemittelt erwärmend wirken (*anthropogener Zusatz-Treibhauseffekt*).

Dabei ist hinsichtlich des zweitgenannten Vorgangs folgendes wichtig: Es handelt sich um die Verstärkung des bereits natürlich existierenden ?Treibhauseffektes? und Erwärmungen treten im Klimageschehen niemals isoliert, sondern stets in (komplizierter) Verknüpfung mit Änderungen weiterer Klimaelemente auf. Zudem sind die regional-jahreszeitlichen Ausprägungen über die Mittlerrolle der atmosphärisch-ozeanischen Zirkulation nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ unterschiedlich (mit leider sowohl qualitativer als auch regionaler Unsicherheit aller Klimamodellrechnungen).

Der *natürliche ?Treibhauseffekt?*, der darin besteht, daß einige Gase der Atmosphäre, allem voran der *Wasserdampf* (H_2O), die Sonneneinstrahlung weitgehend ungehindert zur Erdoberfläche hindurch lassen, jedoch die Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche vermindern, wird nach konventioneller Schätzung auf 33 Grad geschätzt; d.h. ohne diesen Effekt hätten wir eine bodennahe Erdoberflächentemperatur von - 18 °C statt + 15 °C (alternative Schätzungen landen in etwa bei der Hälfte dieser Temperaturdifferenz). Die Venusatmosphäre, die hauptsächlich aus Kohlendioxid besteht, bringt es übrigens auf einen ?Treibhauseffekt? von 466 Grad. Da dies schon seit langem (d.h. schon seit dem vorigen Jahrhundert) nicht nur bekannt, sondern zumindest im Prinzip auch physikalisch verstanden ist, miß jede Veränderung der atmosphärischen Konzentration solcher Gase unweigerlich zu globalen Klimaänderungen führen.

Im Industriezeitalter, d.h. seit ca. 1800/1850, ist die CO_2 - *Konzentration* von ca. 280 ppm (= 0,028 %) auf heute (Jahr 2000) rund 370 ppm angestiegen, was zweifellos anthropogen bedingt ist: Zur Zeit emittiert die Menschheit etwa 30 Milliarden Tonnen CO_2 pro Jahr zusätzlich in die Atmosphäre, woran mit rund 75% die Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas; einschließlich Verkehr), mit 20 % die Waldrodungen (Tropen, Sibirien, Kanada u.a.) und mit 5 % die Holznutzung in den Entwicklungsländern beteiligt sind. Das bedeutet aber nicht, daß es auf anderen Zeitskalen keine, in diesem Fall natürliche Änderungen der Zusammensetzung der Erdatmosphäre gegeben hätte, die ebenfalls klimawirksam waren. (Beispielsweise lag in der letzten ?Eiszeit? die atmosphärische CO_2 -Konzentration bei nur rund 180-200 ppm, weil damals mehr CO_2 im Ozean gebunden war als das heute der Fall ist; vermutlich bestand damals auch eine - global gesehen - geringere Vegetationsbedeckung.)

Derzeitige, sehr unterschiedliche Modellrechnungen schätzen ab, daß die *Menschheit in industrieller Zeit die Weltmitteltemperatur über die Emission von Treibhausgasen bereits um etwa 1 Grad erhöht hat*, wobei übrigens im Gegensatz zum natürlichen ?Treibhauseffekt? CO_2 (mit einem Anteil von rund 60%) die Hauptrolle spielt. Der *tatsächlich beobachtete Trend von etwa 0,5 Grad pro Jahrhundert* läßt sich dadurch erklären, daß die Menschheit über den auf das *Sulfataerosol* zurückgehenden ?*Kühleffekt?* *gleichzeitig eine Abkühlung um etwa 0,3 - 0,5 Grad hervorgerufen hat*, was den insgesamt beobachteten Trend gut erklärt. Diese Interpretation würde bedeuten, daß die *säkulare Erwärmung* unseres Globus *weitgehend anthropogen* ist und natürliche Einflüsse im wesentlichen nur Fluktuationen um diesen anthropogenen Trend herum erzeugt haben. Auch dafür gibt es plausible Modellbefunde. Daraus aber muß geschlossen werden, daß sich bei weiterer menschlicher Einflußnahme der anthropogene globale Klimawandel fortsetzen wird, wobei die Modellvorhersagen bei Trendfortschreibung - d.h. keinen Klimaschutzmaßnahmen - für die nächsten 100 Jahre eine weitere Erwärmung unseres Globus um etwa 1,4 - 5,8 °C projizieren (die Sulfat-Abkühlung eingerechnet).

Wesentlich unklarer ist, wie sich die weiteren Klimaelemente in diesem Zusammenhang verhalten haben bzw. werden und wie generell die *regionale Struktur der anthropogenen wie natürlichen Klimaänderungen* aussieht - wobei trotz globaler Erwärmung auch regionale Abkühlungen möglich sind, beispielsweise im Nordatlantik südlich Grönlands durch eine Abschwächung des Golfstroms (genauer: durch eine Verringerung der *thermohalinen Zirkulation im Bereich des Nordatlantikstroms*, der ein Ausläufer des Golfstroms ist; ein völliges Zusammenbrechen der derzeitigen Golf-/Nordatlantik-Zirkulation wird von den meisten Fachleuten zumindest für die kommenden 100 Jahre ausgeschlossen). Am wahrscheinlichsten sind im Zuge dieser *anthropogenen Klimaänderungen*:

- •*Erwärmung der unteren Atmosphäre*, am ausgeprägtesten im Winter der Kontinente relativ hoher und mittlerer Breiten der Nordhemisphäre;
- •*Abkühlung der Stratosphäre* (mit Begünstigung des dortigen O₃-Abbaus);
- •*Niederschlagsumverteilungen* mit Abnahmen in mediterranen Klimazonen und Zunahmen in den Polargebieten, was dort übrigens zur Zunahme des Polareises führt; in mittleren Breiten niederschlagsreichere Winter und trockenere Sommer;
- •*Meeresspiegelanstieg* aufgrund der Erwärmung des Ozeans (thermische Expansion) und des Rückschmelzens außerpolarer Gebirgsgletscher;
- •*vielleicht Zunahme von Extremereignissen* wie Stürmen u.a., im einzelnen aber sehr unsicher.

Klimaschutzmaßnahmen

Trotz vieler Unsicherheiten im Detail, und zwar sowohl hinsichtlich der Klimamodellierung als auch der Interpretation der Klimabeobachtungsdaten, müssen wir aus dem *Prinzip Verantwortung* die Notwendigkeit weltweiter, baldiger und effektiver Klimaschutzmaßnahmen ableiten, dies freilich mit Augenmaß und ohne in Panik zu verfallen. Anlässlich der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (Rio de Janeiro, 1992) ist daher die *Klimarahmenkonvention* (KRK) verabschiedet worden, die seit 1994 völkerrechtlich verbindlich ist. Sie ist bisher allerdings mehr eine vage Absichtserklärung als ein konkretes Aktionsprogramm, obwohl es bei der *dritten Vertragsstaatenkonferenz* zu dieser Konvention (*Kyoto, 1997*) erste Schritte in Richtung einer angestrebten Reduzierung der Emission der ?Treibhausgase? (bei komplizierten Einzelbestimmungen im globalen Mittel um etwa 6 % bis zur Zeit 2008-2012 gegenüber 1990) gegeben hat. Die weiteren Vertragsstaatenkonferenzen (bis einschließlich Den Haag, 2000) sind bisher an der Frage gescheitert, wie dieses ?Kyoto-Protokoll? real umgesetzt werden soll. Deutschland verspricht derzeit, im Rahmen des Kyoto-Protokolls, eine Emissionminderung um 21%. Global und längerfristig gesehen wird allerdings allein beim CO₂ eine Emissionsminderung um mindestens 50% für notwendig erachtet, um zunächst die Treibhausgas-konzentrationen zu stabilisieren und folglich die anthropogenen Klimaänderungen aufzufangen.

Internationale Gremien wie das *UN Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) berichten regelmäßig über den wissenschaftlichen Stand dieser Klimaproblematik (Working Group I: Science), die Auswirkungen solcher Klimaänderungen (Working Group II: Impacts) und die für erforderlich gehaltenen Maßnahmen (Working Group III: Mitigation).

Kleine Literaturauswahl

H.G. Brauch (Hrsg.): Klimapolitik. Naturwissenschaftliche Grundlagen, internationale Regimebildung und Konflikte, ökonomische Analysen sowie nationale Problemerkennung und Politikumsetzung. Springer, Berlin (1996).

U. Cubasch, D. Kasang: Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes, Gotha (2000).

H. Graßl: Wetterwende. Vision Klimaschutz. Campus, Frankfurt (2000).

J.T. Houghton et al. (eds.): Climate Change 2001. The Scientific Basis (Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). University Press, Cambridge (2001).

J.L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer (Hrsg.): Warnsignal Klima. Das Klima des 21. Jahrhunderts. Wiss. Auswertungen + GEO, Hamburg (1998).

C.-D. Schönwiese: Klimatologie. Ulmer (UTB), Stuttgart (1994, 2. Aufl. voraussichtl. 2002).

C.-D. Schönwiese: Klimaänderungen. Daten, Analysen, Prognosen. Springer, Berlin (1995).

Kleine INTERNET-Auswahl

[Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg](http://www.mpimet.mpg.de)

<http://www.mpimet.mpg.de>

[Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung](http://www.pik.potsdam.de)

<http://www.pik.potsdam.de>

[Deutsche Meteorologische Gesellschaft e.V. \(DMG\)](http://www.met.fu-berlin.de/dmg)

<http://www.met.fu-berlin.de/dmg>

[Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](http://www.ipcc.ch)

<http://www.ipcc.ch>

[World Meteorological Organization \(WMO\)](http://wmo.ch)

<http://wmo.ch>

[National Center for Atmospheric Research \(NCAR\), Boulder, USA](http://www.ncar.ucar.edu)

<http://www.ncar.ucar.edu>

[Climate Research Unit \(CRU\), Norwich, England](http://www.cru.uea.ac.uk)

<http://www.cru.uea.ac.uk>

[Carbon Dioxide Information Analysis Center \(CDIAC\), Oak Ridge, USA](http://cdiac.esd.ornl.gov)

<http://cdiac.esd.ornl.gov>