

Der globale und regionale Klimawandel in Vergangenheit und Zukunft

Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese

Institut für Atmosphäre und Umwelt, der Universität Frankfurt a.M.

Vortrag im Pädagogischen Zentrum Wiesbaden-Naurod, 9. April 2008

1. Motivation und Vortragsübersicht

Der globale Klimawandel findet nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in der Öffentlichkeit große Beachtung. Nicht ohne Grund, denn:

- Die Menschheit und mit ihr alles Leben auf der Erde (Biosphäre) ist hochgradig von der Gunst des Klimas abhängig. Wir alle sind davon betroffen und daher kann es uns nicht gleichgültig sein, was mit dem Klima geschieht.
- Die Menschheit ist mehr und mehr dazu übergegangen, das Klima auch selbst zu beeinflussen. Jeder von uns trägt dazu bei, wenn auch in sehr unterschiedlichem Ausmaß. Daraus erwächst uns eine besondere Verantwortung.

Das erste Faktum, die Klimaabhängigkeit, hat besonders dann gravierende Folgen, wenn es zu einem systematischen Klimawandel aufgrund relativ langfristiger Trends kommt und wenn Extremereignisse häufiger bzw. intensiver werden. Dabei hängt das eine mit dem anderen zusammen. Das zweite Faktum, die anthropogene Klimabeeinflussung, steht mit Recht im Blickpunkt der wissenschaftlichen und öffentlichen Diskussion, weil sie im Lauf des Industriezeitalters ein globales und immer intensiveres Ausmaß erreicht hat.

Leider gibt es gerade bei der Wahrnehmung und Bewertung der anthropogenen Klimabeeinflussung eine seltsame Diskrepanz, auf die u.a. die US-amerikanische Professorin für Wissenschaftsgeschichte, N. Oreskes (2004), hingewiesen hat. Mit Hilfe des Suchmodus „Klimawandel“ hat sie 928 Artikel von Wissenschaftlern erfasst, die in begutachteten Zeitschriften veröffentlicht worden sind, und parallel 636 entsprechende Artikel aus der Tagespresse. Alle diese Artikel wurden dann dahingehend untersucht, ob sie den anthropogenen Klimawandel bezweifeln. Das Ergebnis war 0 % bei den wissenschaftlichen Fachartikeln (wobei ein Viertel davon nur das Phänomen des Klimawandels und nicht die Ursachen behandelte) und 53 % in der Tagespresse. Wer seine Informationen über den Klimawandel vorwiegend aus den Medien bezieht, läuft daher Gefahr, ein schiefes Bild vermittelt zu bekommen. Wie weitgehend dagegen der Konsens in der Wissenschaft ist, belegen auch die Berichte des UN Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007).

Im folgenden soll zunächst geklärt werden, was Klima überhaupt ist, da es häufig mit dem Wetter verwechselt wird. Danach wird exemplarisch ein Blick auf den Klimawandel in der Vergangenheit geworfen, und zwar sowohl global als auch in den regionalen Ausprägungen (insbesondere Deutschland). Davon ausgehend erfolgt dann eine zusammenfassende Diskussion der Ursachen, wobei zwischen natürlichen und anthropogenen Vorgängen zu unterscheiden ist. Alternative Zukunftsszenarien sind die Grundlage für entsprechende Klimamodellprojektionen, die einerseits erhebliche Unsicherheiten beinhalten, aber andererseits erhebliche Risiken erkennen lassen. Das betrifft nicht zuletzt die Auswirkungen des Klimawandels. Schließlich werden daraus einige Konsequenzen gezogen.

2. Klima: Begriffsklärung

Die Definition des Klimas umfasst im wesentlichen zwei Aspekte (Schönwiese, 2003), einen deskriptiven und einen kausalen. Deskriptiv ist – in aller Kürze gesagt – das Klima die Statistik der Wetterereignisse über eine relativ lange Zeit. Dabei lassen sich die Wetterereignisse durch bestimmte Messgrößen wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Bewölkung, Niederschlag, Wind usw. an bestimmten Orten (das globale Messnetz umfasst derzeit rund 10 000 Stationen) zu bestimmten Zeitpunkten erfassen. Als relativ lange Zeit sind von der Weltmeteorologischen Organisation (WMO) bzw. ihrer Vorgängerin mindestens 30 Jahre festgelegt worden, was zwar willkürlich ist, sich aber empirisch bewährt hat. Die verfügbaren Klimarekonstruktionen gehen jedoch weit darüber hinaus, bis hin zu Jahrillionen und Jahrmilliarden.

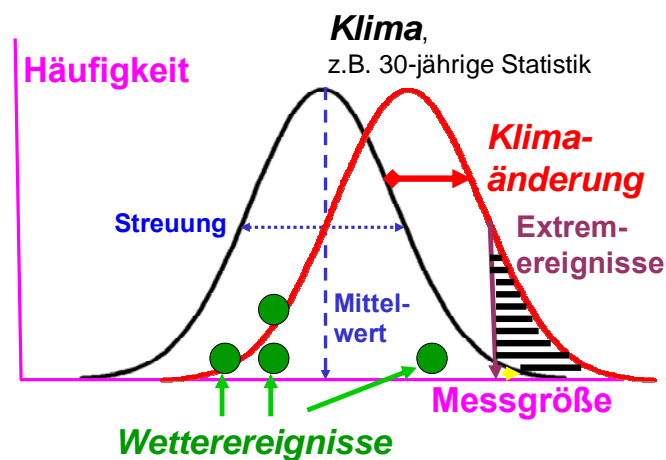


Abb. 1: Zur Unterscheidung von Wetter und Klima, wobei die schwarze Kurve eine idealisierte Häufigkeitsverteilung (hier Normalverteilung) ist. Falls sich das Klima ändert, verschiebt sie sich (rote Kurve), was sich nicht nur auf den Mittelwert (\rightarrow Trend), sondern auch auf die Eintrittswahrscheinlichkeit von Extremereignissen auswirkt. Die kleine gelbe („altes“ Klima) bzw. zusätzlich die schwarz schraffierte Fläche („neues“ Klima) sind ein Maß dafür (vgl. Text).

Die statistischen Aspekte sind vielfältig, aber einer der wichtigsten ist sicherlich die Häufigkeitsverteilung, siehe Abb. 1. In idealisierter Form (in Abb. 1 handelt es sich um die Normalverteilung; Details hierzu siehe Schönwiese, 2006) lassen sich solche Verteilungen durch ihren Mittelwert (im speziellen Fall der Abb. 1 zugleich der häufigste Wert) und die Streuung, ggf. zusätzlich durch einen speziellen Formparameter beschreiben. Es könnte nun sein, dass sich das stets variable Wetter im Rahmen einer solchen Häufigkeitsverteilung bewegt, ohne dass sich dieser Rahmen – sprich das Klima – ändert. Kommt es aber zum Klimawandel, dann verändert sich der Mittelwert, was man als Trend bezeichnet (im Fall einer sozusagen systematischen Mittelwertdrift); zudem könnte sich auch die Streuung ändern. Außer solchen Trends ist der Effekt auf Extremereignisse besonders wichtig: Deren Häufigkeit, theoretisch gesehen Eintrittswahrscheinlichkeit (daher heißt die in Abb. 1 dargestellte Kurve auch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) nimmt mit dem Klimawandel zu oder auch ab, was in Abb. 1 durch die kleine gelbe bzw. schwarz schraffierte Fläche gekennzeichnet ist. In exakter mathematischer Form handelt es sich um die Berechnung der betreffenden bestimmten Integrale. Im Rahmen der Diskussion der Klimavariabilität ist darauf noch etwas näher einzugehen (hier allerdings ohne mathematische Details).

3. Klimawandel der Vergangenheit: Beobachtungen und Rekonstruktionen

Das Klima der Erde ist variabel in allen Größenordnungen der Zeit und des Raums, seit die Erde existiert, und dies aus den unterschiedlichsten Gründen (IPCC, 2007; Rahmstorf und Schellnhuber, 2007; Endlicher und Gerstengarbe, 2007; Schönwiese, 2003). Es würde hier zu weit führen, auch nur die wichtigsten Erkenntnisse der auf indirekten Rekonstruktionen beruhenden Paläoklimatologie aufzuführen, die maximal bis 3,8 Milliarden Jahre zurückreichen (bei einem Erdalter von 4,6 Milliarden Jahren). Erwähnt sei jedoch, dass die Erde nach dem Ende der letzten Kaltzeit (Würm-, „Eiszeit“), als die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur maximal ca. 4-5 °C tiefer lag als heute, d.h. in den letzten rund 10 000 Jahren, ein relativ stabiles Klima erlebt hat, was für die kulturelle und wirtschaftliche Entwicklung der Menschheit sicherlich von Vorteil war. Trotzdem dürfen die Klimaänderungen der letzten Jahrtausende und ihre Auswirkungen nicht unterschätzt werden.

Als Beispiel sei eine der inzwischen zahlreichen Rekonstruktionen (IPCC, 2007) der Temperaturvariationen vorgestellt, die die letzten rund 2000 Jahre erfassen, siehe Abb. 2. Man erkennt ein relativ hohes Niveau um ca. 950-1150 (Mittelalterliches Warmklima), das ungefähr der Situation 1961-1990 entspricht, danach eine deutliche Abkühlung (sog. Kleine Eiszeit) und schließlich eine rasante Erwärmung. Für diese jüngste Zeit, das Industriezeitalter, liegen direkt gewonnene Messdaten wesentlich größerer Genauigkeit vor, zudem in so guter räumlicher Verteilung, dass daraus Abschätzungen für die global gemittelten Temperaturvariationen (Landgebiete und Ozeane) seit 1850 zugänglich sind; siehe Abb. 3. Die genannte rasante Erwärmung zeigt sich dort als nicht linearer Langfristtrend von rund +0,7 °C ($\pm 0,2$ °C), der jedoch von deutlichen Fluktuationen unterschiedlicher Struktur überlagert ist, so dass die wesentliche Erwärmung auf die Zeit 1917-1944 sowie, nach einer vorübergehenden leichten Abkühlung, ab 1956 bzw. 1976 konzentriert ist. Dabei stellt das Jahr 1998 offenbar den bisherigen Wärmerekord dar (und dies gilt nach Abb. 2 sogar für die letzten beiden Jahrtausende). Berechnet man lineare Trends, so ergeben sich für 1901-2000 wiederum ein Wert von rund +0,7 °C (0,07 °C pro Jahrzehnt) und für 1981-2000 rund 0,3 °C (genauer +0,34 °C, entsprechend 0,17 °C pro Jahrzehnt), somit eine Trendverstärkung, worauf ja auch schon die Nicht-Linearität des Gesamttrends hinweist (Abb. 3, rot gestrichelte Linie).

Bei solchen, zunächst gering erscheinenden Trendwerten ist zu beachten, dass es sich hier nicht um Wetter-, sondern Klimaphänomene handelt (vgl. Kap. 1). Dabei tritt das wichtige Phänomen in Erscheinung, dass zunächst gering erscheinende Erwärmungen, wenn sie nur lange genug anhalten (wie das für das Klima typisch ist), wesentlich drastischere Folgen haben können als die meist viel heftigeren, aber eben kurzzeitigen Wetterereignisse. Zwei Beispiele sollen hier genannt sein: Die Meereisbedeckung der Arktis, die seit ungefähr 1970 durch Satellitensondierungen beobachtet wird, zeigt derzeit im Sommer einen Rückgang um 7-8 % pro Jahrzehnt (IPCC, 2007) und hat sich jüngst noch verstärkt. Geht dieser Trend so weiter, könnte dieses Eis bis ungefähr zur Mitte unseres Jahrhunderts im Sommer total verschwunden sein. Das zweite Beispiel sind die Gebirgsgletscher. Im Industriezeitalter haben sie sich in den meisten Regionen der Erde, sofern nicht statt der Temperatur die Niederschlagssteuerung dominiert (das kann in relativ kalten Klimazonen wie z.B. Norwegen oder der Antarktis der Fall sein) erheblich zurückgezogen, während auch sie viel zu träge sind, um auf die i.a. quantitativ viel größeren, aber eben kurzzeitigen Kapriolen des Wetters

zu reagieren. Für die Alpen wird seit 1850 ein Massenverlust von rund 50 % angegeben (Häberli et al., 2007; siehe auch die eindrucksvolle Foto-Dokumentation der Gesellschaft für ökologische Forschung).

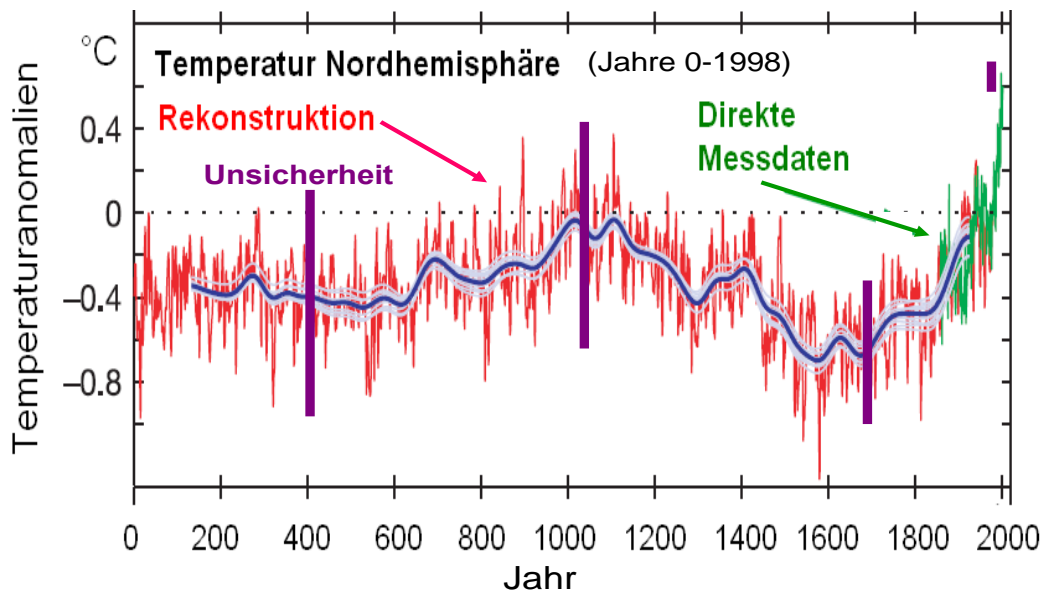


Abb. 2: Paläoklimatologische und somit indirekte Rekonstruktion der relativen jährlichen Anomalien (d.h. Abweichungen vom Referenzmittelwert 1961-1990) der nordhemisphärisch gemittelten bodennahen Lufttemperatur, rote Kurve, mit Hervorhebung der Langfristkomponente durch 80-jährige Glättung, blaue Kurve, im Vergleich mit Abschätzungen, die auf direkten Messdaten beruhen, grüne Kurve. Insgesamt ist die Zeit 0-1998 abgedeckt (nach Moberg et al. 2005, ergänzt). Die vertikalen Balken vermitteln einen Eindruck der Unsicherheit der jeweiligen Abschätzungen (in Anlehnung an IPCC, 2007).

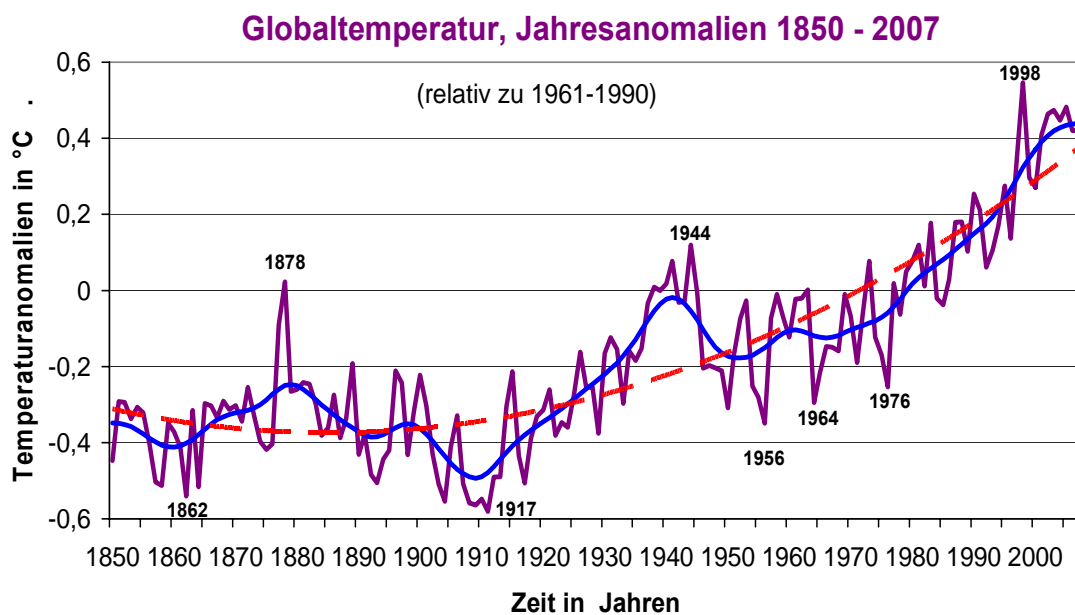


Abb. 3: Jährliche Anomalien (Referenzintervall 1961-1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1850-2007, basierend auf direkten Messungen (Land- und Ozeangebiete), violette Kurve, 20-jährige Glättung, blaue Kurve, und Trend, rot gestrichelt (Datenquelle: Jones et al., 1999; CRU, 2008; bearbeitet).

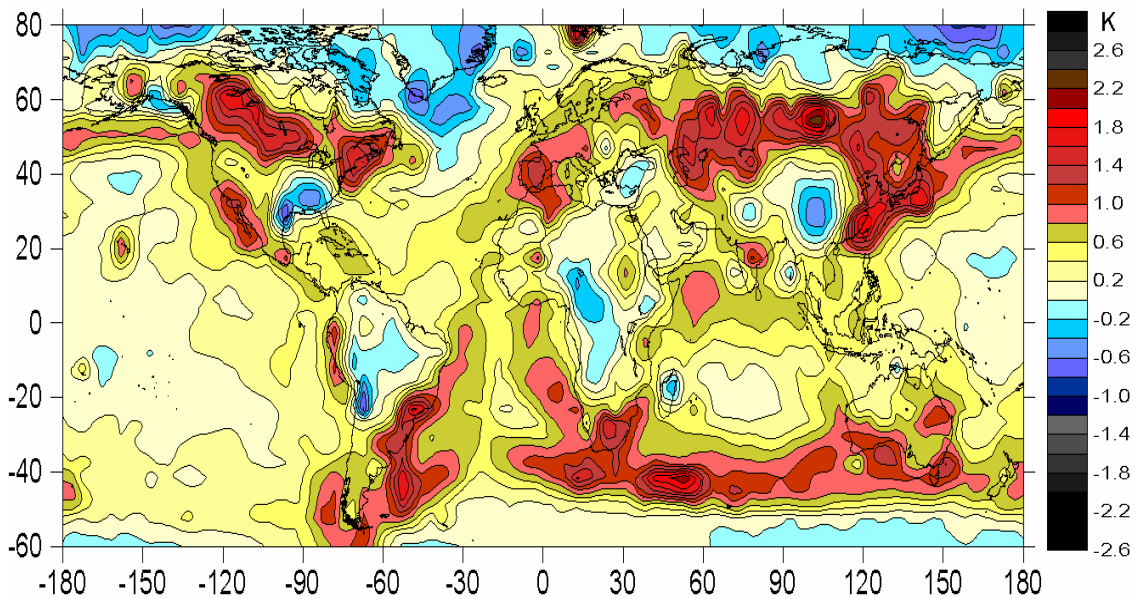


Abb. 4. Lineare Trends 1901 - 2000 der Jahreswerte der bodennahen Lufttemperatur in °C, Globalanalyse auf der Grundlage eines 5° x 5° - Gitterpunktdatensatzes (Datenquelle: Jones et al., 1999, 2008, bearbeitet).

Allerdings wird die Interpretation der beobachteten Klimaänderungen dadurch erschwert, dass sie außer ihrer zeitlichen Struktur auch ausgeprägte räumliche Strukturen aufweisen, somit regional sehr unterschiedlich ablaufen. Betrachtet man lediglich die Temperaturrends 1901-2000 (ohne überlagerte Fluktuationen), jedoch in räumlicher Differenzierung, so ergibt sich ein sehr kompliziertes Bild; siehe Abb. 4. Zwar überwiegt offenbar die Erwärmung, zum Teil sogar deutlich ausgeprägter als im globalen Mittel; sie geht aber mit regionalen Abkühlungen, beispielsweise im Bereich des Nordatlantiks, Hand in Hand. Zudem sind diese Strukturen jahreszeitlich unterschiedlich und zeitlich nicht stabil (Rapp, 2000; Schönwiese und Rapp, 1997). Und beim in vielerlei Hinsicht im Vergleich mit der Temperatur wichtigeren Klimaelement Niederschlag kommen noch die wesentlich größere Messfehlerbelastung und geringere räumliche Repräsentanz hinzu (Schönwiese und Rapp, 1997; Beck et al., 2007).

Aus Abb. 4 lässt sich bereits darauf schließen, dass Deutschland in einer Region mit relativ starker Erwärmung liegt. Tab. 1, in der eine Differenzierung nach den Zeitintervallen 1901-2000 und 1951-2000 sowie nach den Jahreszeiten vorgenommen ist, bestätigt das: Säkular (1901-2000) ist die Erwärmung in allen Jahreszeiten ungefähr gleich groß, mit einem Anstieg der Jahresmittelwerte um rund 1,0 °C (somit deutlich mehr als im globalen Mittel). In den letzten Jahrzehnten hat sich dann vor allem die winterliche Erwärmung verstärkt, während die herbstliche (zunächst) fast zum Stillstand gekommen ist. Die in Tab. 1 zusätzlich angegebenen Niederschlagstrends zeigen, dass ebenfalls im Winter eine sich verstärkende Zunahme aufgetreten ist, während der Niederschlag im Sommer verstärkt zurück geht. Da gerade im Sommer konvektive (d.h. mit Schauern/Gewittern verbundene) und somit relativ kleinräumige Niederschlagsereignisse dominieren, kann die Komplikation auftreten, dass trotz großräumiger Tendenz zu weniger Niederschlag diese kleinräumigen Niederschlagsereignisse extremer werden (IPCC, 2007; vgl. auch unten). Frühling und Herbst zeigen Niederschlagszunahmen.

Tab. 1: Übersicht der beobachteten Temperatur- (bodennah) und Niederschlagstrends in Deutschland (nach Rapp, 2000; Schönwiese und Janoschitz, 2005/2003, ergänzt).

Klimaelement	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur, 1901 – 2000	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C	+ 1,1 °C	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C
1951 – 2000	+ 1,4 °C	+ 0,9 °C	+ 0,2 °C	+ 1,6 °C	+ 1,0 °C
Niederschlag, 1901 – 2000	+ 13 %	- 3 %	+ 9 %	+ 19 %	+ 9 %
1951 – 2000	+ 14 %	- 16 %	+ 18 %	+ 19 %	+ 6 %

Dass selbst innerhalb einer so kleinen Region wie Deutschland die Klimatrends sehr unterschiedlich sind, insbesondere beim Niederschlag, zeigt Abb. 5, wo die Niederschlagstrends 1901-2000 für den Winter und Sommer verglichen sind. Man erkennt, dass sich die winterlichen Niederschlagszunahmen auf den Westen und Süden konzentriert haben (mit Trendwerten bis über 50 %), dagegen im Osten nur geringe, teils sogar gar keine Niederschlagstrends in Erscheinung treten. Im Sommer stehen sich – bei insgesamt geringeren Trendwerten (kaum über 10 %) – leichte Abnahmen (insbesondere im Osten) und leichte Zunahmen (im Süden, zum Teil auch im Nordwesten und Norden) gegenüber.

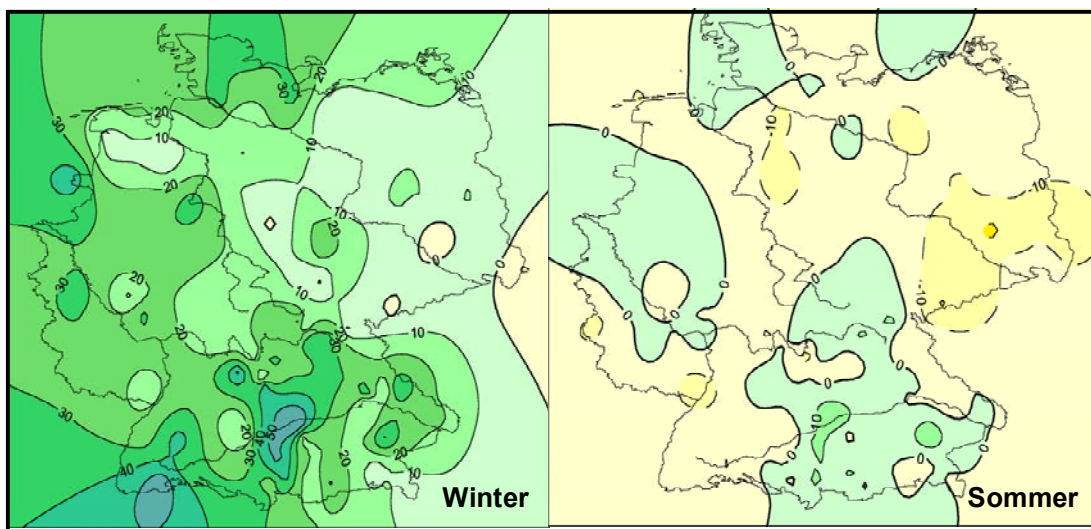
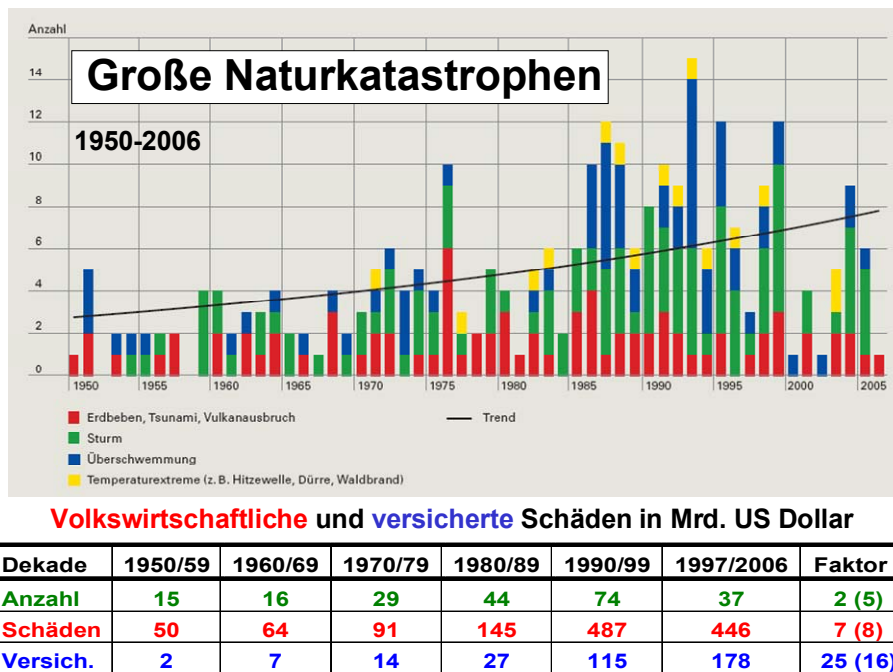


Abb. 5: Vergleich der prozentualen Niederschlagstrends 1901-2000 im Winter, links, und im Sommer, rechts, in Deutschland (nach Schönwiese und Janoschitz, 2005); Zunahmen sind grün/blau, Abnahmen gelb markiert.

Klimawandel kann sich nicht nur in Form relativ langfristiger Trends, sondern auch durch Änderungen in der Häufigkeit bzw. Intensität von Extremereignissen äußern. Dabei haben z.B. der extreme europäische Hitzesommer 2003 (Schönwiese et al., 2004) und die Überschwemmungen in der Elbe-Region im Sommer 2002 gezeigt, dass auch Deutschland von solchen Extremereignissen nicht verschont bleibt (siehe dazu Anhang sowie u.a. Jonas et al., 2005; Schönwiese und Trömel, 2006; Staeger et al., 2006). Dieser Aspekt verdient viel Aufmerksamkeit, wobei hier zunächst auf die Statistiken der Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft hingewiesen sei, siehe Abb. 6, die weltweit zum einen die jährliche Anzahl sog. großer Naturkatastrophen (definiert als Extremereignisse, die überregionale Hilfe erfordern)

erfassen, zum anderen dekadewise das Ausmaß der damit verbundenen volkswirtschaftlichen bzw. versicherten Schäden. Besonders beim Schadensausmaß ist der enorme Anstieg auffällig, wobei dieser Anstieg nur bei den klimarelevanten Ereignissen signifikant ist. Jedoch muss dies vorsichtig interpretiert werden, weil sich in diesen Schäden u.a. auch der Anstieg der Wertekonzentrationen in den gefährdeten Gebieten widerspiegelt. Andererseits waren nach WMO-Angaben (2002) in der Dekade 1991-2000 bei solchen „Disastern“ rund 90 % der Todesfälle und rund 70 % der der volkswirtschaftlichen Schäden klimabedingt.



* 1997/2006 (in Klammern 1990/99) gegenüber 1960/69; Quelle: MüRück, Berz, 2007

Abb. 6: Anzahl großer Naturkatastrophen 1950-2006 weltweit, oben, und dadurch verursachte volkswirtschaftliche (rot) sowie versicherte (blau) Schäden, Tabelle unten, 2. und 3. Zeile (nach Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2005, 2007).

Man kann der Frage, ob das Klima extremer wird, auch ohne Betrachtung der Schäden, allein mit Hilfe der klimatologischen Extremwertstatistik nachgehen. Spezielle Analysen für Deutschland haben gezeigt, dass bei der Temperatur zumeist extrem warme bzw. heiße Monate bzw. Jahreszeiten häufiger und relativ kalte seltener werden, im Prinzip so, wie das in Abb. 1 schematisch gezeigt ist (Jonas et al., 2005; Beck et al., 2007). Beim Niederschlag, insbesondere im Winter und im Westen sowie Süden von Deutschland, kommt aber noch der Effekt dazu, dass die Streuung zunimmt. Wie das Beispiel Abb. 7 für die Station Eppenrod (bei Limburg, Lahn- und somit Rhein-Einzugsgebiet) zeigt, nimmt dadurch die Eintrittswahrscheinlichkeit sowohl für extrem niederschlagsarme als auch niederschlagintensive Wintermonate zu, letzteres allerdings deutlich ausgeprägter als ersteres (Trömel, 2005; Schönwiese und Trömel, 2006; Beck et al., 2007). Die Tendenz des Eintretens von Monaten mit extrem viel Niederschlag ist in Abb. 8 in Form von Deutschland-Karten für die Monate Januar und August gezeigt. Danach nimmt diese Tendenz im Winter weitgehend flächendeckend zu, regional (z.B. Bayern) aber auch im Sommer.

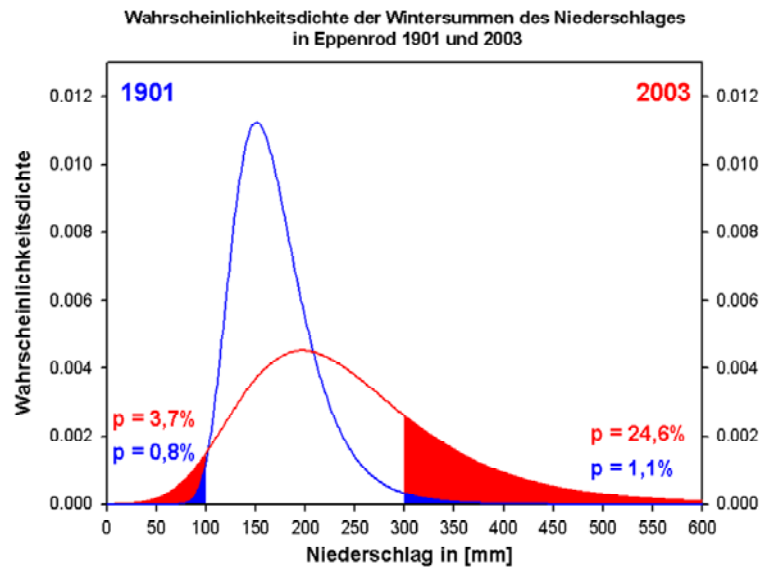


Abb. 7: Änderung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (normierten theoretischen Häufigkeitsverteilung, hier Gumbel-Verteilung) für die Wintersummen des Niederschlages an der Station Eppenrod ($50,4^\circ \text{ N } 8,0^\circ \text{ E}$, in der Nähe von Limburg) von 1901 (blau) bis 2003 (rot). Mittelwert und Modus (häufigster Wert, d.h. Maximumwert der Kurve) haben zugenommen, aber gleichzeitig ist die Verteilung „breiter“ geworden (Zunahme der Streuung). Die Prozentzahlen geben an, wie sich das auf die Eintrittswahrscheinlichkeit von ≤ 100 mm sowie von ≥ 300 mm ausgewirkt hat. Der Kehrwert davon ist die sog. Jährlichkeit, d.h. die statistische Erwartung, wie oft derartige Ereignisse im statistischen Mittel zu erwarten sind (ergibt bei ≥ 300 mm, also extrem viel Niederschlag, für 1,1% \rightarrow ca. 91 Jahre und für 24,6% \rightarrow ca. 5 Jahre; nach Schönwiese et al., 2006).

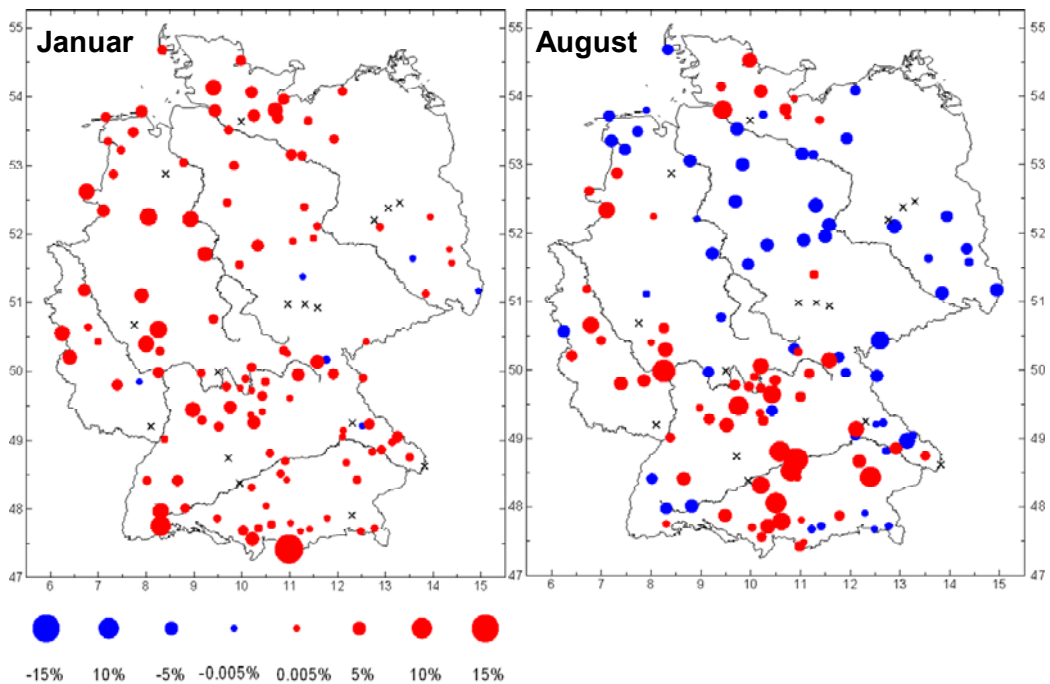


Abb. 8: Trends 1901-2000 der Überschreitungswahrscheinlichkeit extrem hoher Niederschläge (hier definiert als 95%-Perzentile) in Deutschland, wobei rote Kreise Zu- und blaue Kreis Abnahme bedeuten (x keine signifikante Änderung; nach Schönwiese und Trömel, 2006).

4. Ursachendiskussion: Natürliche Faktoren und menschliche Einflüsse

Noch weitaus komplizierter als die hier in nur wenigen Beispielen vorgestellten Indizien für die Klimaänderungen der Vergangenheit sind ihre Ursachen. Um sich diesem Problem zu nähern, muss das Konzept des Klimasystems eingeführt werden (Cubasch und Kasang, 2000; IPCC 2007, Schönwiese 2003). Es besteht aus den Komponenten Atmosphäre, Hydrosphäre (Salzwasser des Ozeans und Süßwasser der Kontinente), Kryosphäre (Land- und Meereis), Pedo-/Lithosphäre (Boden und Gesteine, somit feste Erdoberfläche) und Biosphäre (insbesondere Vegetation), siehe Abb. 9. Innerhalb und zwischen diesen Komponenten gibt es eine Vielzahl von Wechselwirkungen, beispielsweise zwischen Atmosphäre und Ozean, was u.a. das El-Niño-Phänomen hervorruft. Es tritt in episodischen Erwärmungen der tropischen Ozeane, insbesondere des tropischen Ostpazifiks vor der Küste von Peru und Ecuador in Erscheinung, beinhaltet einen Zyklus von ca. 3-7 Jahren und ist für den hohen Anomaliewert 1998 der Globaltemperatur (vgl. Abb. 3) verantwortlich. Einige dieser Wechselwirkungen sind mit Rückkopplungsprozessen verbunden, die aus kleinen Ursachen große Wirkungen machen können (positive Rückkopplung) und umgekehrt (negative Rückkopplung).

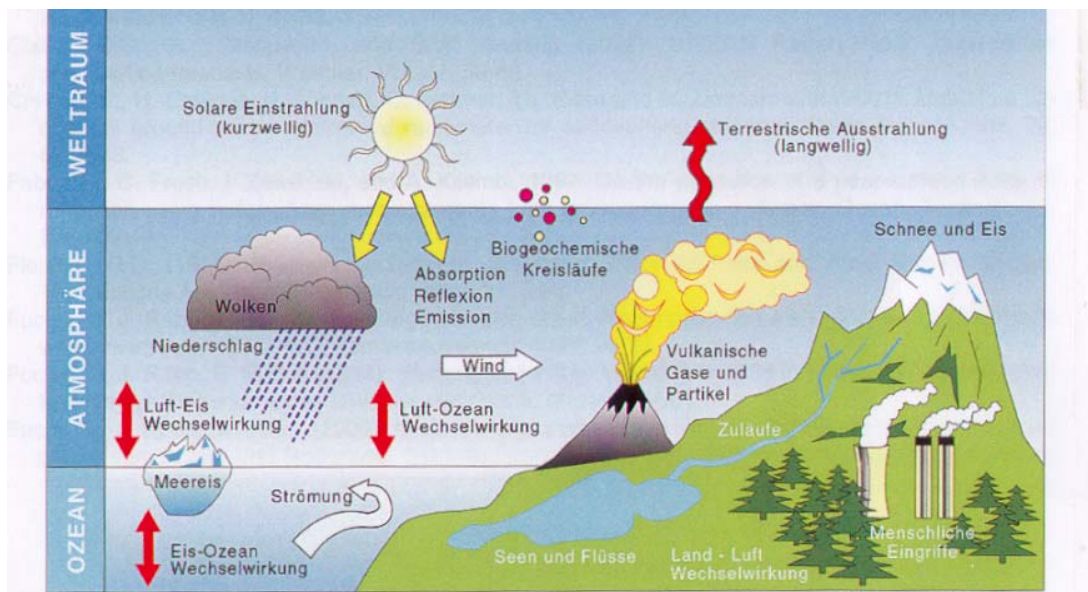


Abb. 9: Schema des Klimasystems (nach Cubasch und Kasang, 2000); näheres siehe Text.

Davon sind die sog. externen Einflüsse zu unterscheiden, bei denen es eine wohldefinierte Ursache und ebensolche Wirkung gibt, ohne dass die Wirkung auf die Ursache zurückwirkt. Ein Beispiel dafür ist die Variation der Sonneneinstrahlung (Schönwiese, 2003), wobei in der zeitlichen Größenordnung von Jahren bis Jahrhunderten vor allem die Sonnenaktivität wichtig ist. Zu Zeiten der „unruhigen“ Sonne, in Quasizyklen von ca. 11, 22, 75-90, 180-200 usw. Jahren, führt dies zu einer leichten Erwärmung der gesamten Atmosphäre. Außerdem gibt es Zeiten fast ohne jegliche Sonnenaktivität (z.B. 1645-1715, das sog. Maunder-Minimum), in denen diese Erwärmung ausbleibt. Ein weiteres Beispiel ist der explosive Vulkanismus, der nach größeren Vulkanausbrüchen für wenige Jahre die Stratosphäre, d.h. die Schicht in ca. 10-50 km Höhe, im globalen Mittel erwärmt und simultan die untere Atmosphäre abkühlt.

Das dritte Beispiel, das im folgenden eingehender beleuchtet werden soll, ist der Mensch. Die entsprechenden anthropogenen Einflüsse sind durchaus vielfältig und zeigen sich beispielsweise im sog. Stadtklima, das sich wegen der dortigen Bebauung, Bodenversiegelung und Wärmeabgabe deutlich vom Klima des Umlands unterscheidet (insbesondere sog. städtische Wärmeinsel; Fezer, 1995; Schönwiese, 2003). Generell ist jede Veränderung der Erdoberfläche klimarelevant, so dass sich über die Umwandlung von Natur- in Kulturlandschaften, einschließlich Waldrodungen, die anthropogenen Einflüsse historisch bis zu einigen Jahrtausenden zurückverfolgen lassen (Schönwiese, 2003).

Doch steht der Klimafaktor Mensch hinsichtlich des Industriezeitalters mit Recht in besonderem Maß im Blickpunkt, weil in dieser Zeit die anthropogene Klimabeeinflussung nicht mehr nur regional, sondern global wirksam ist und zudem besonders rasch und intensiv abläuft. Zwei Vorgänge sind dabei von hervorgehobener Bedeutung: erstens der Ausstoß klimawirksamer Spurengase (Kohlendioxid, Methan usw.) als Folge der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas, einschließlich Verkehr), aber auch als Folge von neuzeitlichen Waldrodungen (z.B. in den Tropen) sowie industrieller und landwirtschaftlicher Produktion; zweitens die Bildung von Schwebpartikeln, insbesondere Sulfataerosolen, aufgrund des Ausstoßes besonderer toxischer Spurengase (in diesem Fall Schwefeldioxid, das sich in der unteren Atmosphäre in Sulfatpartikel umwandeln). Der erstgenannte Vorgang führt im globalen Mittel zu einer Erwärmung der unteren Atmosphäre und gleichzeitig Abkühlung der Stratosphäre, genannt (zusätzlicher!) anthropogener „Treibhauseffekt“; der zweitgenannte Vorgang, ebenfalls im globalen Mittel, zu einer Abkühlung der unteren Atmosphäre (siehe u.a. IPCC, 2007; Roedel, 2000; Schönwiese, 2003).

Hintergrund dieser Entwicklung, siehe Abb. 10, ist einerseits der Anstieg der Weltbevölkerung, die derzeit (Frühjahr 2008) 6,7 Milliarden erreicht hat, und der Anstieg der Energienutzung, genauer Weltprimärenergienutzung, die derzeit in der Größenordnung von 16,5 Mrd. t SKE (Tonnen Steinkohleeinheiten) liegt. Davon gehen 88 % auf fossile Energieträger zurück, was seit 1900 bis 2007 die zusätzliche anthropogene Emission allein von Kohlendioxid (CO₂) von rund 2 auf 29 Mrd. t pro Jahr hat ansteigen lassen. Hinzu kommen noch rund 8 Mrd. t pro Jahr durch Waldrodungen einschließlich eines kleinen Betrags durch Zementproduktion und (nicht nachhaltige) Holznutzung. Dies ergibt die immense Summe von derzeit 37 Mrd. t pro Jahr. Und auf diesen massiven Einfluss reagiert die Atmosphäre: Trotz diverser Puffermechanismen im globalen Kohlenstoffkreislauf – so nimmt der Ozean grob die Hälfte der zusätzlichen anthropogenen CO₂ auf – ist dort die Konzentration von vorindustriell (ca. 1750/1800) rund 280 ppm auf heute über 380 ppm angestiegen (Jahresmittelwert 2006 an der Station Mauna Loa, Hawaii: rund 382 ppm, für 2008 ca. 385 ppm erwartet). In Tab. 2 und 3 sind die Zahlenwerte der anthropogenen Emissionen von CO₂ und den weiteren klimawirksamen Spurengasen zusammengestellt, einschließlich einer Aufschlüsselung der verschiedenen Quellen, sowie die daraus resultierenden atmosphärischen Konzentrationsanstiege. Nicht unerwähnt bleiben darf in diesem Zusammenhang, dass in den letzten rund 10.000 Jahren, vor der Industrialisierung, die atmosphärische CO₂-Konzentration ziemlich konstant bei etwa 270-280 ppm lag. Davor, in der letzten Kaltzeit (Würm-, „Eiszeit“) betrug sie nur ca. 180-200 ppm, dies aber als Folge und nicht als Ursache von Klimaänderungen, obwohl damit auch Rückkopplungsvorgänge verbunden waren. Eine so hohe Konzentration wie heute hat es zumindest in den letzten ca. 600 000 Jahren nie gegeben (IPCC, 2007).

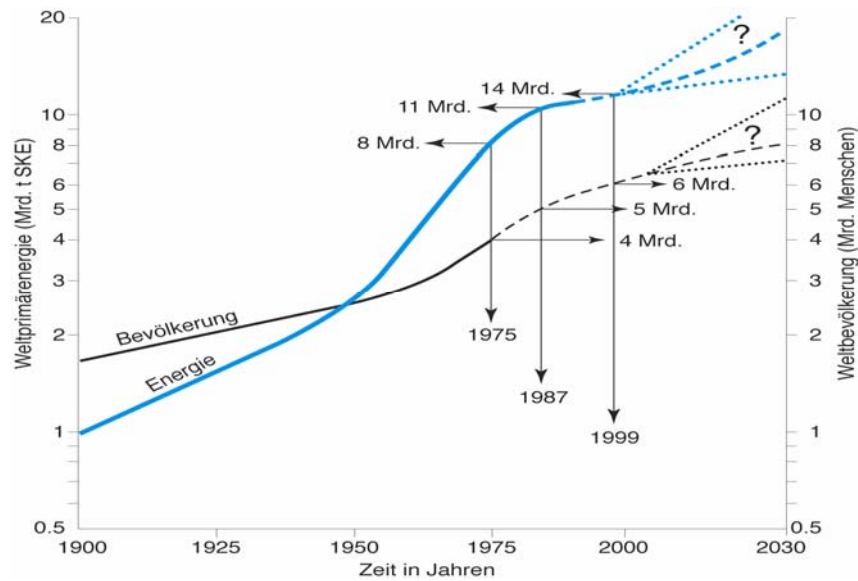


Abb. 10: Anstieg der Weltbevölkerung und Weltprimärenergie Nutzung seit 1900 (viele Quellen, hier nach Schönwiese, 2003). Die Zahlen für 2007 lauten: 6,7 Mrd. Menschen und rund 16,5 Mrd. t SKE.

Tab. 2: Übersicht der wichtigsten Charakteristika klimawirksamer Spurengase („Treibhausgase“, bodennahe Mittelwerte) mit Emissionen und Konzentrationen (jeweils 2006, vorindustrielle Konzentrationen ca. 1750/1800 in Klammern) sowie Abschätzung der Beiträge zum natürlichen (vorletzte Spalte) bzw. anthropogenen Treibhauseffekt (letzte Spalte; Quellen: IPCC, 2007; Schönwiese, 2003; Lozán et al., 2001; natürlicher Treibhauseffekt nach Kiehl und Trenberth, 1997); Mt = 10^6 t (Mill. t), Gt = 10^9 t (Mrd. t); ppm = 10^{-6} , ppb = 10^{-9} Volumenprozent.

Spurengas, Symbol	Anthropogene Emissionen	Atmosphärische Konzentrationen	Treibh. natürlich	Treibh. anthrop.**
Kohlendioxid, CO ₂	37 Gt /Jahr	382 (280) ppm	26 %	56 %
Methan, CH ₄	400 Mt /Jahr	1,8 (0,7) ppm	2 %	16 %
FCKW *	0,4 Mt /Jahr	F12: 0,5 (0) ppb	-	11 %
Distickstoffoxid, N ₂ O	15 Mt /Jahr	0,32 (0,27) ppm	4 %	5 %
Ozon (bodennah), O ₃	0,5 Gt /Jahr (?)	40 (5?) ppb	8 % ***	11 % ***
Wasserdampf, H ₂ O	Vernachlässigbar	2,6 (2,6) %	60 %	(indirekt)

*) Fluorchlorkohlenwasserstoffe **) in Relation der Strahlungsantriebe, weitere Gase 1 %

Tab. 3: Aufschlüsselung der anthropogenen Emissionen zu Tab. 2.

CO ₂ : 74 % fossile Energie, 23 % Waldrodungen, 3% Zementproduktion und Holznutzung
CH ₄ : 27% fossile Energie, 23% Viehhaltung, 17% Reisanbau, 16% Abfälle (Müll, Abwasser), 11% Biomasse-Verbrennung, 6% Tierexkremte
FCKW: Treibgas in Spraydosen, Kältetechnik, Dämm-Material, Reinigung
N ₂ O: 23 – 48% Bodenbearbeitung (einschl. Düngung), 15-38% chemische Industrie, 17 - 23% fossile Energie, 15 – 19% Biomasse-Verbrennung
O ₃ : indirekt über Vorläufersubstanzen wie z.B. Stickoxide (NO _x ; Verkehr, Industrie u.a.)

Sowohl diese Veränderungen der atmosphärischen Konzentrationswerte klimawirksamer Spurengase, einige weitere anthropogene Faktoren als auch diverse natürliche Vorgänge wie die Sonnenaktivität und der explosive Vulkanismus lassen sich, da sie externe Einflüsse auf das Klimasystem sind, in sog. Strahlungsantrieben quantitativ kennzeichnen, im allgemeinen zunächst in globaler Mittelung und für die untere Atmosphäre (Troposphäre); siehe Tab. 4. In allen diesen Fällen ändert sich nämlich der Strahlungs- und Wärmehaushalt des Subsystems Atmosphäre-Erdoberfläche, was als energetische Störung dieses Subsystems aufgefasst werden kann. Im Fall des Vulkanismus ist dieser Strahlungsantrieb negativ, weil die erhöhte Streuung der Sonneneinstrahlung an den vulkanogenen Partikeln der Stratosphäre diese Einstrahlung reduziert, mit dem Effekt einer Abkühlung an und in der Nähe der Erdoberfläche. Umgekehrt lassen die klimawirksamen Spurengase die Sonneneinstrahlung weitgehend ungehindert zur Erdoberfläche hindurch, absorbieren aber im Bereich (genauer Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums) der terrestrischen Ausstrahlung, erwärmen sich dabei und strahlen auf entsprechend höherem Energieniveau allseitig und somit teilweise zur Erdoberfläche zurück. Dieses Phänomen heißt, wie schon oben erwähnt, Treibhauseffekt, die beteiligten Gase werden daher auch Treibhausgase genannt.

Tab. 4: Mittlere globale Strahlungsantriebe in der unteren Atmosphäre (Troposphäre) ca. 1750-2005 nach IPCC (2007), (Vorzeichen V: + Erwärmung, – Abkühlung), anthropogene Einflüsse grau unterlegt, und zugehörige empirisch-statistisch (mittels neuronaler Netze) geschätzte bodennahe Temperatursignale 1866-1998 nach Walter und Schönwiese (2002).

Einfluss (Klimafaktor)	V	Strahlungsantrieb	Signal	Signalstruktur
„Treibhausgase“ (TR)	+	3.0 (2.7 - 3.6) Wm ⁻²	0.9 - 1.3 °C	progressiver Trend
Troposphär. Sulfat (SU)	–	1.2 (0.4 - 2.7) Wm ⁻² **	0.2 - 0.4 °C	uneinheitlicher Trend
Kombiniert (TR + SU)	+	~ 1.8 Wm ⁻²	0.5 - 0.7 °C	uneinheitlicher Trend
Ruß	+	0.1 (0.0 - 0.2) Wm ⁻²	-	Trend
Stratosphär. Ozon ***	–	0.05 (+0.05, -0.15) Wm ⁻²	-	Trend
Stratosph. Wasserdampf	+	0.07 (0.02 - 0.12) Wm ⁻²	-	Trend
Albedo (Landnutzung)	–	0.2 (0 - 0.4) Wm ⁻²	-	Trend
Flugverkehr ****	+	0.01 (0.003-0.03) Wm ⁻²	-	Trend
<i>Summe anthropogen</i>	+	<i>1.6 (0.6-2.4) Wm⁻²</i>	<i>(0.5 - 0.7 °C)</i>	<i>Trend</i>
Vulkaneruptionen	–	max. ~ 3 Wm ⁻² *****	0.1 - 0.2 °C	episodisch(1-3 Jahre)
Sonnenaktivität	+	0.1 (0.06 - 0.3) Wm ⁻²	0.1 - 0.2 °C	fluktuativ
El Niño (ENSO)	+	- (interner Vorgang)	0.2 - 0.3 °C	episodisch (Monate)

*) dabei CO₂ 1,7; CH₄ 0,5; FCKW 0,3 und N₂O 0,2 Wm⁻²

**) einschließlich indirektem Strahlungsantrieb, der dabei – 0,7 (0.3 - 1.8) Wm⁻² ausmacht

***) troposphärisches O₃ in TR enthalten, Strahlungsantrieb ca. 0,3 Wm⁻²; stratosphärisches O₃

****) nur Kondensstreifen-Effekt, darüber hinaus Beiträge zu TR und zum stratosphärischen Wasserdampf

*****) Pinatubo: 1991 → 2,4 Wm⁻², 1992 → 3,2 Wm⁻², 1993 → 0,9 Wm⁻² (McCormick et al., 1995)

Wichtig ist, vgl. Tab. 2, dass die Beiträge der einzelnen Gase zum natürlichen Treibhauseffekt (der im globalen Mittel konventionell mit ca. 33 °C angegeben wird) und zu seiner anthropogenen Verstärkung, um dies es hier geht (vgl. Signal in Tab. 4), ganz unterschiedlich

sind. Wichtig ist weiterhin, dass im Industriezeitalter, vgl. wiederum Tab. 4 (vom IPCC für die Zeit ab 1750 definiert), der Strahlungsantrieb aufgrund der anthropogenen atmosphärischen Konzentrationserhöhung der klimawirksamen Spurengase (anthropogener Treibhauseffekt) dominiert, auch wenn der Vulkanismus in der gleichen Größenordnung wirksam ist, allerdings immer nur für wenige Jahre (vgl. Signalstruktur in Tab. 4, die den zeitlichen Verlauf der jeweiligen Störung des Klimasystems angibt), während der anthropogene Treibhaus-effekteinfluss eine langfristig-progressive Signalstruktur aufweist, somit systematisch immer wirksamer geworden ist. Die Sonnenaktivität spielt in dieser zeitlichen Größenordnung (ganz im Gegensatz zur zeitlichen Größenordnung der letzten Jahrtausende, vgl. Abb. 2, wo dieser natürliche Einfluss dominiert) eine sehr untergeordnete Rolle und kann zudem die beobachtete Abkühlung der Stratosphäre nicht erklären (IPCC, 2007; Schönwiese, 2003).

Im einzelnen resultieren aus diesen Einflüssen überaus komplizierte Vorgänge im Klimasystem, einschließlich der Modifizierung durch Wechselwirkungen bzw. Rückkopplungen, was sich nicht nur quantitativ auswirkt, sondern auch unterschiedliche regionale Strukturen des Klimawandels zur Folge hat. In entsprechend aufwändigen Modellen wird dies simuliert (Cubasch und Kasang, 2000; IPCC, 2007) und mit Hilfe empirisch-statistischer Methoden, die auf Beobachtungsdaten beruhen, verifiziert (Schönwiese, 2003; Walter u. Schönwiese, 2002).

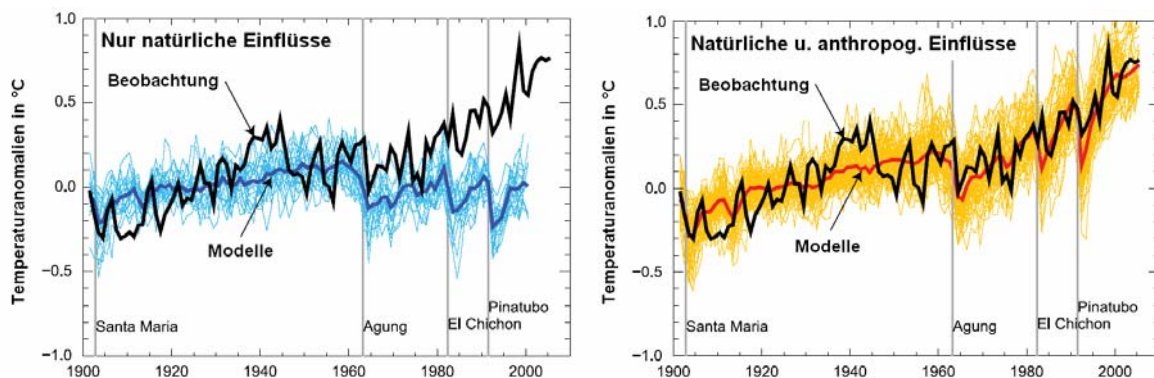


Abb. 11: Beobachtete relative Temperaturvariationen, vgl. Abb. 2, 1900-2005, schwarz, und Reproduktion durch 23 Modelle, die nur natürliche Einflüsse, links, bzw. auch anthropogene Einflüsse berücksichtigen, rechts; die mittleren Modellsimulationen sind dick blau bzw. dick rot eingezeichnet (IPCC, 2007).

Aufgabe dieser Klimamodelle ist es nun, zunächst für die Vergangenheit das Zusammenspiel der verschiedenen natürlichen und anthropogenen Einflüsse auf das Klimasystem zu simulieren. Abb. 11 zeigt, dass dabei zumindest der global gemittelte bodennahe Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte nur verständlich ist, wenn man die anthropogenen Einflüsse mit berücksichtigt, insbesondere den zusätzlichen anthropogenen „Treibhauseffekt“. Das IPCC (2007) hält es für „extrem unwahrscheinlich“, dass diese globale Erwärmung, die jedoch ähnlich Abb. 4 komplizierte regionale Strukturen aufweist, nicht anthropogen ist. Entsprechend zeigen empirisch-statistische Abschätzungen (u.a. Grieser et al., 2000; Walter und Schönwiese, 2002), dass der beobachtete Langfristtrend (vgl. Abb. 3, rot gestrichelte Kurve) weitgehend anthropogen und nur die überlagerten Fluktuationen natürlichen Ursprungs sind (im wesentlichen aufgrund von Vulkanismus, El Niño und Sonnenaktivität,

die allerdings beim Übergang auf die letzten Jahrtausende, vgl. Abb. 2, weitaus größere Bedeutung hat).

4. Zukunftsperspektiven: Szenarien und Modellprojektionen

Das weitgehende klimatologische Verständnis der Vergangenheit ermöglicht nun Zukunftsperspektiven. Allerdings wächst damit die Unsicherheit erheblich. Streng genommen sind nämlich Klimavorhersagen, vergleichbar den Wettervorhersagen, nicht möglich. Das hängt u.a. damit zusammen, dass viele natürliche Einflüsse wie z.B. der Vulkanismus prinzipiell nicht vorhersagbar sind und auch das künftige Verhalten der Menschheit ist alles andere als sicher. Man behilft sich daher so, dass natürliche Mechanismen, soweit sie nicht mit den anthropogenen Einflüssen wechselwirken, ganz ausgespart bleiben und alternative Annahmen über die anthropogenen Einflüsse, insbesondere die Emission klimawirksamer Spurengase, gemacht werden, die sog. Szenarien. Um dies von der Technik der Wettervorhersage strikt zu unterscheiden, spricht man von bedingten Szenarien-gestützten Klimamodellprojektionen.

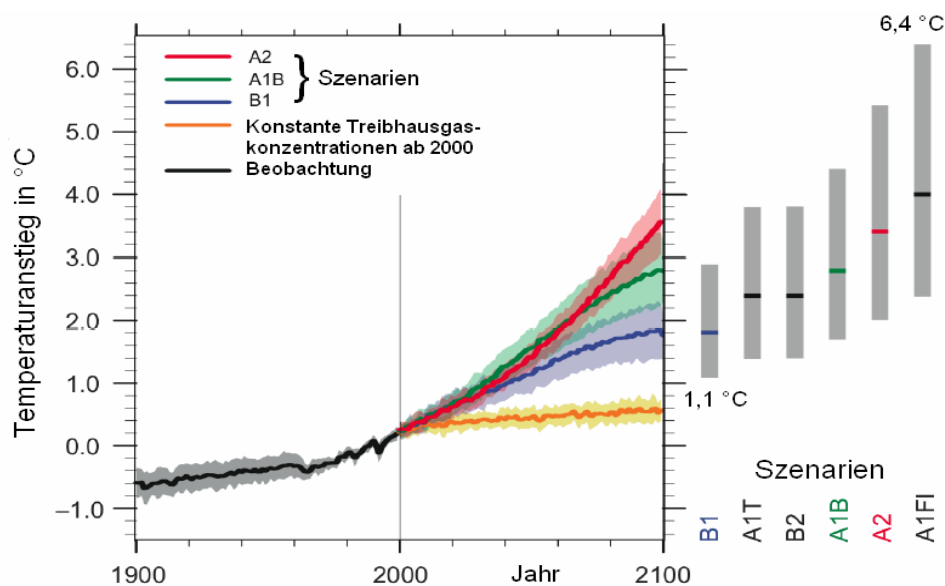


Abb. 12: Global gemittelter bodennaher Temperaturanstieg 1900-2000, der hinsichtlich des Langfristtrends als weitgehend anthropogen interpretiert wird, und erwartete weitere Entwicklung bis 2100 aufgrund von 23 Klimamodellrechnungen, die von einigen ausgewählten Szenarien (genannt B1 usw.) der anthropogenen Emission klimawirksamer Spurengase ausgehen (IPCC, 2007).

Die Abb. 12 zeigt die Ergebnisse solcher Modellrechnungen. Daraus ist nicht nur ersichtlich, dass die verschiedenen Szenarien zu unterschiedlichen Erwartungen des Anstiegs der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur in der Zukunft führen, sondern auch, dass die verschiedenen Modelle wegen ihrer intern unterschiedlichen Prozessbehandlung (sog. Parametrisierungen, insbesondere hinsichtlich der Wolken) sogar bei identischen Szenarien in ihren Ergebnissen streuen. Insgesamt ergibt sich bei der hier (Abb. 12) gezeigten Auswahl von Szenarien eine erwartete Erhöhung der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur zwischen 1,1 °C und 6,4 °C (IPCC, 2007). Zu diesen Unsicherheiten kommen noch die der regionalen Strukturen des anthropogenen Klimawandels, obwohl sich darin durchaus einige

Ähnlichkeiten mit den bereits eingetretenen Trends erkennen lassen. Für die Temperatur und den Niederschlag ist das aus Abb. 13 und 14 (im Vergleich mit Kap. 3) erkennbar. Hingewiesen sei exemplarisch auf die relativ stark Erwärmung im Bereich der Kontinente und in der Arktis, den Niederschlagsrückgang in den Subtropen, darunter der Mittelmeerregion, und die Niederschlagszunahme in der subpolaren und polaren Zone (IPCC, 2007). Für Mitteleuropa wird im Winter eine Zunahme und im Sommer eine Abnahme des Niederschlags erwartet, wiederum in qualitativer Übereinstimmung mit den Trends der Vergangenheit. Regionale Klimamodelle mit besserer räumlicher Auflösung bestätigen dies sowie eine relativ starke Erwärmung (für Deutschland nach Szenario A1B bis 2100 um ca. 2,5-3,5 °C mit Maxima von über 4 °C im Süden und Winter; Jacob et al., 2007).

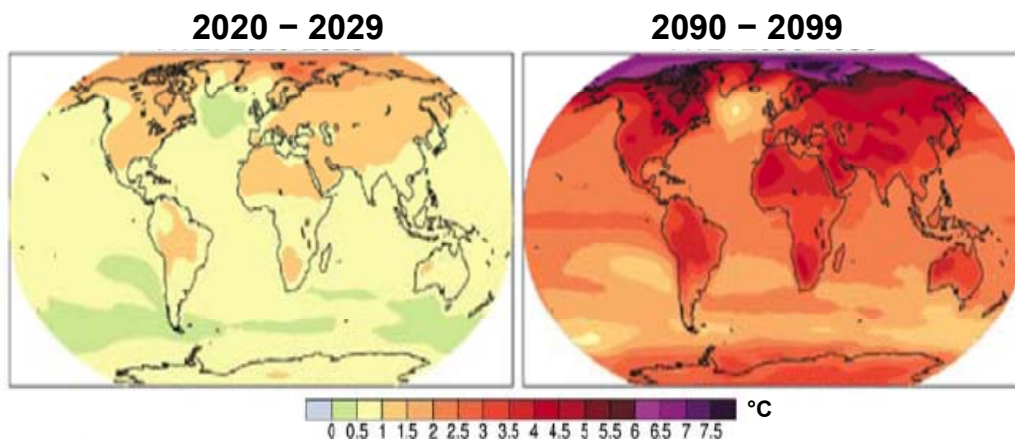


Abb. 13: Anstieg der bodennahen Jahresmitteltemperatur bis zu den angegebenen Zeitintervallen gegenüber 1980-1999 nach Szenario A1B; Mittel aus 23 Klimamodellrechnungen (IPCC, 2007).

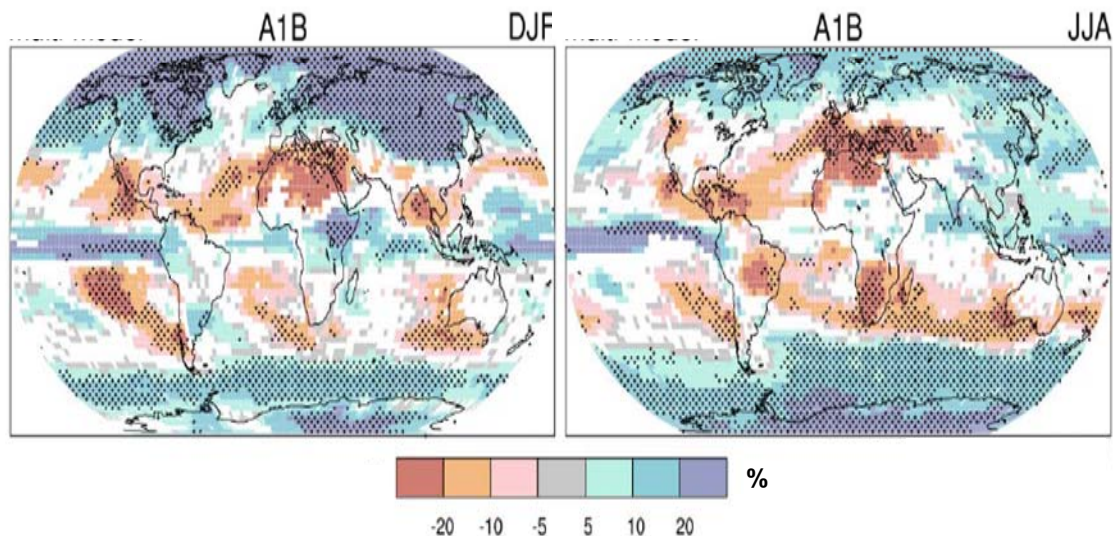


Abb. 14: Prozentuale Niederschlagsveränderungen bis 2090-2099 gegenüber 1980-1999 nach Szenario A1B; Mittel aus 23 Klimamodellrechnungen (IPCC, 2007).

Ob sich dieser Klimawandel auch auf die Extremereignisse auswirken wird, ist zwar ebenfalls unsicher, aber im Prinzip durchaus wahrscheinlich. Relativ klar ist, dass vielerorts extreme Kälte seltener und extreme Hitze häufiger wird. So lassen regionale Modellrechnungen für die

Schweiz ein häufigeres Eintreten von Hitze-Dürre-Sommern erwarten, wie das in Europa 2003 der Fall war, und die bisherigen Temperaturrekorde könnten dabei sogar noch übertroffen werden (Schär et al., 2004), übrigens auch im Mittelmeerraum. Beim Niederschlag könnten sich sowohl extrem hohe Raten als auch Trockenheit intensivieren (IPCC, 2007), regional und jahreszeitlich zwar unterschiedlich, aber zumindest teilweise ähnlich wie das schon in der Vergangenheit beobachtet worden ist (vgl. Kap. 3). Bei den tropischen Wirbelstürmen gibt es kaum Indizien für eine Häufigkeitszunahme generell, wohl aber für eine Gewichtverschiebung in Richtung der stärkeren auf Kosten der schwächeren (IPCC, 2007), was in Kombination mit dem Meeresspiegelanstieg für küstennahe Zonen in Zukunft noch wesentlich problematischer werden könnte als das jetzt schon der Fall ist. In der Tab. 4 sind die derzeitigen Modellerwartungen für das 21. Jahrhundert grob zusammengefasst.

Tab. 4: Summarische Auflistung einiger Klimamodellprojektionen für das 21. Jahrhundert (2100 gegenüber 2000) aufgrund der Emission klimawirksamer Spurengase (anthropogener Treibhauseffekt; nach IPCC, 2007).

Temperatur, bodennah	Erwärmung der unteren Atmosphäre (global bis 2100 um 1,1 - 6,4 °C, wahrscheinlichster Bereich 2 - 4 °C; Maxima im Winter der Nordhemisphäre polwärts der Tropen)
Temperatur, Stratosphäre	Abkühlung, dabei Trend quantitativ deutlich stärker als in der unteren Atmosphäre (begünstigt den stratosphärischen Ozonabbau)
Meeresspiegelhöhe	Anstieg im globalen Mittel um rund 20 - 60 cm (unterschätzt?)
Niederschlag	Niederschlagsumverteilungen (z.B. Mittelmeer-Region trockener, Skandinavien u. Polarregionen feuchter; in Mitteleuropa niederschlagsreichere Winter und trockenere Sommer)
Extremereignisse	Regional häufiger bzw. intensiver bzw. beides (z.B. Hitzewellen, Dürren, Starkniederschläge, Hagel; aber im einzelnen teilweise sehr unsicher; intensivere tropische Wirbelstürme)

Die Folgen dieses Klimawandels können zum Teil positiv sein, beispielsweise weil in mittleren und hohen geographischen Breiten im Winter weniger geheizt werden muss, nördliche Regionen (z.B. die Nord-/Ostsee) auf verstärkten Tourismus hoffen können sowie vielerorts die Vegetationsperiode und somit die Zeit landwirtschaftlicher Nutzung potentiell länger wird. Aber gerade dieser letztgenannte Vorteil kann beispielsweise durch die mit Hitzesommern verbundene Dürre überkompensiert werden. So sehen die Fachleute insgesamt auch mehr Nach- als Vorteile, insbesondere in den Bereichen Wasser (teils zu wenig, mit negativen Folgen für die Trinkwasserversorgung und Landwirtschaft, somit Nahrungsmittelproduktion; teils zu viel mit der Folge von Überschwemmungen), Ökologie (u.a. durch negative Auswirkungen auf die Artenvielfalt) und Gesundheit. Manche Regionen wie z.B. die Mittelmeerländer oder die Küsten können besonders betroffen sein, erstere durch Dürre und somit Engpässe bei der Wasserversorgung, letztere wenn sich Meeresspiegelanstieg und intensivere Stürme in ihren Effekten überlagern. Dürre führt u.a. auch dazu, dass Waldbrände (auch wenn sie häufig auf Brandstiftung zurückgehen) außer Kontrolle geraten können.

Diese Auswirkungen haben nicht zuletzt auch negative Folgen für die Wirtschaft. Einige Gefahren für die Landwirtschaft sind bereits genannt worden. Aber auch die industrielle Produktion ist u.a. durch Überschwemmungen oder Sturmereignisse gefährdet. Direkt wahrnehmbar ist das durch die Versicherungswirtschaft, wie bereits anhand der Zahlen Klima-bedingter volkswirtschaftlicher und versicherter Schäden erläutert (Abb. 6 und Anhang). In jüngerer Zeit haben auch einige Verlautbarungen von Ökonomen für Aufsehen gesorgt, so durch N. Stern, früher Chefökonom der Weltbank (Stern Review, 2006), wonach jede Tonne CO₂, die anthropogen zusätzlich in die Atmosphäre gebracht wird, einen Schaden von 85 US\$ verursacht (ergibt bei einer geschätzten weltweiten Emission von derzeit 37 Mrd. t CO₂, vgl. Tab. 2, einen Schaden von über 3.100 Mrd. US\$ pro Jahr), oder die Berichte des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW, Kemfert et al., 2006, 2007), in denen allein für Deutschland kumulativ bis 2050 ein klimabedingter Schaden von rund 800 Mrd. € befürchtet wird. Da auch diese Zahlen Unsicherheiten beinhalten, kann man den ökonomischen Schaden durch den anthropogenen Klimawandel auch in Faktoren des globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP) ausdrücken. Dafür gibt der Stern Review vorsichtig geschätzt einen Faktor zwischen 5 und 20 an, während der Aufwand für Klimaschutzmaßnahmen mit günstigenfalls nur dem Faktor 1 beziffert wird. Klimaschutz ist somit, über die naturwissenschaftlich-klimatologischen Aspekte hinaus, auch ökonomisch sinnvoll.

5. Konsequenzen

Da das Klima mit erheblicher Zeitverzögerung auf die anthropogene Beeinflussung reagiert, wird uns nichts anderes übrig bleiben, als uns auf den bereits unvermeidlichen weiteren Klimawandel und seine Auswirkungen anzupassen, auch wenn das nicht immer einfach sein wird. Dabei rechnen die Zeitverzögerungen von einigen Jahrzehnten, beispielsweise beim in Mitteleuropa zu erwartenden Klimawandel, bis zu Jahrhunderten beim Meeresspiegelanstieg.

Um aber diesen Klimawandel nicht völlig ausufern zu lassen, sind zugleich baldige und wirkungsvolle Klimaschutzmaßnahmen erforderlich. Dies gebietet unsere Verantwortung für die uns überlassene Erde, aus religiöser Sicht für die Schöpfung, einschließlich unserer Verantwortung für die kommenden Generationen, die aller Voraussicht nach von unserem Tun noch weitaus stärker betroffen sein werden als wir Verursacher selbst. Auch muss realisiert werden, dass „Täter“ und „Opfer“ vielfach unterschiedlich sind, nämlich erstere vor allem die Industrieländer und letztere weitgehend die Entwicklungsländer (auch wenn beispielsweise die USA durchaus auch erheblich betroffen sind und sein werden).

Politisch und international ist 1992 die UN-Klimarahmenkonvention (Framework Convention on Climate Change, FCCC) verabschiedet worden, die seit 1994 völkerrechtlich verbindlich ist. Sie beinhaltet im Kern das Ziel, die „... Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen ... auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche Störung des Klimasystems verhindert wird“. Mangels quantitativer und zeitlicher Festlegungen gibt es dazu seit 1995 jährlich sog. Vertragstaatenkonferenzen (Conferences of Parties, COPs), die dies konkretisieren sollen. Daraus ist u.a. das sog. Kyoto-Protokoll (1997) hervorgegangen, das gegenüber 1990 bis 2008-2012 eine Verminderung der Emission einer Gruppe von Treibhausgasen weltweit um 5,2 % vorsieht (mit unterschiedlichen Beiträgen der einzelnen Länder; z.B. EU 8 %, Deutschland 21 %). Da dies bei weitem nicht ausreicht (vgl. dazu Deut. Bundestag, 1995; WBGU, 2003) – werden derzeit (2007/2008) im EU-Rahmen

Reduktionsziele von 20-30 % bis 2020 anvisiert, in Deutschland um 40 %. Längerfristig, nämlich bis 2050, hält das IPCC (2007) allein beim CO₂ eine Minderung von 50-85 % für erforderlich. Allgemein gilt dabei eine Erhöhung der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur um mehr als ca. 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau für nicht akzeptabel.

Im Detail gibt es sicherlich keinen Königsweg. Vielmehr sind umfangreiche Maßnahmenpakete angesagt, um diese ehrgeizigen Ziele zu erreichen. Dabei stehen eine ganze Gruppe von Treibhausgasen und die betreffenden menschlichen Aktivitäten im Blickpunkt. Folglich seien hier kurz aufgelistet:

- Steigerung der Energieeffizienz (Wirkungsgrade, Dämm- und Regeltechnik, Kraft-Wärme-Kopplung, usw.);
- Substitution (zumindest teilweise) kohlenstoffhaltiger Energieträger (Kohle, Öl, Gas) durch Alternativen, kürzerfristig auch Schwerpunktverlagerung in Richtung Gas.
- Sequestrierung des CO₂ aus der Energienutzung (sobald dies technologisch einsatzreif ist, aber auch dann nur für wenige Jahrzehnte möglich);
- Maßnahmen im Verkehrsbereich (geringere Nutzung und sparsamere Fahrzeuge).
- Vegetationsschutz (mindestens Erhalt, möglichst aber noch Ausdehnung).
- Ökonomische Maßnahmen (insbesondere Emissionshandel).

Als positive Begleiteffekte solcher Maßnahmen eröffnen sich durch die rasche weitere Entwicklung umweltfreundlicher Maßnahmen (zur Reinhaltung von Luft, Wasser und Boden) sowie alternativer Energietechniken (Sonne, Wind, Biomasse, Wärmepumpen usw.) erhebliche Marktchancen für die Zukunft. Schließlich halten Ökonomen den Aufwand für Klimaschutzmaßnahmen für wesentlich geringer als die ökonomischen Folgekosten des „Nichts-Tuns“ in Kauf zu nehmen (Stern, 2006). Das ist ein Argument, das zu den oben erwähnten ethischen Aspekten (Prinzip Verantwortung) noch hinzukommt.

Literatur

- Beck, C., et al., 2007: Entwicklung einer Beobachtungsdatengrundlage für DEKLIM und statistische Analyse der Klimavariabilität. Bericht Nr. 6, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/M.
- CRU (Climatic Research Unit, UK), 2008: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>
- Cubasch, U., Kasang, D., 2000: Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes, Gotha-Stuttgart.
- Deutscher Bundestag, Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“, 1995: Mehr Zukunft für die Erde. Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz. Economica, Bonn.
- Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.), 2007: Der Klimawandel- Einblicke, Rückblicke, Ausblicke. Im Auftrag der Deut. Ges. f. Geographie, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Humboldt-Universität zu Berlin, Potsdam; <http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel/>
- Fezer, F., 1995: Das Klima der Städte. Klett-Perthes, Gotha.
- Gesellschaft für ökologische Forschung e.V.: Gletscherarchiv., <http://gletscherarchiv.de>
- Grieser, J., Staeger, T., Schönwiese, C.-D., 2000: Statistische Analyse zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes. Bericht Nr. 103, Inst. Meteorol. Geophys. Univ. Frankfurt/Main.
- Haeberli, W., Maisch, M., 2007. Klimawandel im Hochgebirge. In Endlicher, W. Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): Der Klimawandel (s.o.), S. 98-107.

- IPCC (Solomon, S., et al., eds.), 2007: Climate Change 2007. The Physical Science Basis (Contribution of Working Group I). Cambridge Univ. Press, Cambridge; <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>; dort auch Berichte der Arbeitsgruppen II und III sowie Synthese-Bericht.
- Jacob, D., 2007: Klimaänderung in Europa. Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit. In Zentrum für Umweltforschung (ZUFO) der Universität Münster, Heft 17, S. 87-100.
- Jonas, M., Staeger, T., Schönwiese, C.-D., 2005: Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen (Schwerpunkt Deutschland). Bericht Nr. 1, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/Main.
- Jones, P.D., et al., 1999: Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Rev. Geophys.*, 37, 173-199; siehe auch CRU.
- Kemfert, C., 2007: Der Mensch beeinflusst das Klima – Was muss er dafür bezahlen? Die ökonomischen Kosten des Klimawandels. In Zentrum für Umweltforschung (ZUFO) der Universität Münster, Heft 17, S. 125-133; DIW (Deut. Inst. f. Wirtschaftsforschung, Berlin), 2007: Klimawandel in Deutschland: Kosten in Milliardenhöhe treffen Wirtschaftsbereiche; <http://www.diw.de/programme/jsp/presse.jsp?pcode=569&language=de>
- Kiehl, J.T., Trenberth, K.E., 1997: Earth's annual global mean energy budget. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78, 197-208.
- Lozán, J.L., Graßl, H., Hupfer, P. (Hrsg.), 1998: Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. 465 S., Wissenschaftliche Auswertungen + GEO, Hamburg; engl. überarbeitete Ausgabe 2001.
- McCormick, P.M., et al, 1995: Atmospheric effects of Mt. Pinatubo eruption. *Nature*, 373, 399-404.
- Moberg, A., et al., 2005: Highly variable northern hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433, 613-617.
- MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft), 2006...2008: Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre), Eigenverlag, München.
- Oreskes, N., 2004: Beyond the ivory tower – The scientific consensus on climate change. *Science*, 306, 1686.
- Rahmstorf, S. Schellnhuber, H.J., 2007: Der Klimawandel. Diagnose, Prognose, Therapie. C.H. Beck, München.
- Rapp, J., 2000: Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Bericht Nr. 212, Deut. Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach.
- Roedel, W., 2000: Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre. Springer, Berlin.
- Schär, C., et al., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, 332-336.
- Schönwiese, C.-D., 2003: Klimatologie. 2. Aufl., Ulmer (UTB), Stuttgart (3. Aufl., 2008, in Vorber.).
- Schönwiese, C.-D., 2006: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, 4. Aufl., Borntraeger, Stuttgart.
- Schönwiese, C.-D., 2007: Wird das Klima extremer? Eine statistische Perspektive. In Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W.: Der Klimawandel (s.o.), S.60-66.
- Schönwiese, C.-D., Janoschitz, R., 2005: Klima-Trendatlas Deutschland 1901-2000. Bericht Nr. 4, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/M.
- Schönwiese, C.-D., Rapp, J., 1997: Climate Trend Atlas of Europe Based on Observations 1891 - 1990. Kluwer Academic Publ., Dordrecht (update 2008: Bericht Nr. 7, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/M.).
- Schönwiese, C.-D., Staeger, T., Steiner, H., Brinckmann, S., 2006: Analyse der Klimaveränderungen in Hessen für den zeitraum 1901 bis 2003. Bericht Nr. 3, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/M.
- Schönwiese, C.-D., Staeger, T., Trömel, S., 2004: The hot summer 2004 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis. *Meteorol. Z.*, 13, 323-327.
- Schönwiese, C.-D., Trömel, S., 2006: Mehr extreme Niederschläge in Deutschland? *Naturwiss. Rdsch.*, 59, 194-199.
- Staeger, T., Jonas, M., Schönwiese, C.-D., 2006: Auftreten und Andauer extremer Witterungsereignisse in Hessen (1951-2000). Bericht Nr. 5, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/M.
- Stern, N., 2006: The Stern Review. The Economics of Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Trömel, S., 2005: Statistische Modellierung von Klimazeitreihen. Bericht Nr. 2, Inst. Atmosph. Umwelt Univ. Frankfurt/M.

Walter, A., Schönwiese, C.-D., 2002: Attribution and detection of anthropogenic climate change using a backpropagation neural network. Meteorol. Z., 11, 335-343.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen), 2003: Über Kioto hinaus denken: Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert (Sondergutachten und Presseerklärung vom 25.11.2003; http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_presse.html).

WMO (World Meteorol. Org.), 2002: Reducing the vulnerability to weather and climate extremes. Publ. WMO-No. 936, Geneva.

Anmerkung:

Die Publikation Endlicher und Gerstengarbe ist für schulische Zwecke geeignet. Über Internet sind sowohl die dortigen Beiträge (pdf-Format) als auch die zugehörigen Abbildungen (ppt-Format) herunterladbar.

Internet-Homepage des Autors: <http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima/>

Eine kürzlich erstellte Sammlung grafischer Darstellungen zum Klimawandel, erstellt speziell für schulische Zwecke, findet sich dort unter:

http://www.geo.uni-frankfurt.de/fb/fb11/iau/klima/PDF_Dateien/Sw_112E_2008.pdf

Anhang: Größte Naturkatastrophen der Versicherungsgeschichte 1900-2007 (Auswahl*)

Datum	Jahr	Land, Region	Ereignis	Tote	Schäden Mill. US \$	Versich.+ Mill. US \$
18.4.	1906	USA, San Francisco	Erdbeben	3.000	524	180
1.9.	1923	Japan, Tokio	Erdbeben	142.807	2.800	590
23.10.	1972	Nicaragua, Managua	Erdbeben	11.000	800	100
14.-22.9.	1989	Karibik, USA	Hurrikan (Hugo)	86	9.000	4.500
25.1.-1.3.	1990	Westeuropa	Stürme (Daria u.a.)	230	14.800	10.200
26.-28.9.	1991	Japan, Kiuschu u.a.	Taifun (Mireille)	62	6.000	5.200
23.-27.8.	1992	USA, Florida u.a.	Hurrikan(Andrew)	62	30.000	17.000
17.1.	1994	USA, Kalifornien	Erdbeben	61	44.000	15.300
17.1.	1995	Japan, Kobe	Erdbeben	6.348	100.000	3.000
5.7.-10.8.	1997	Ost- u. Mitteleuropa	Überschwemm.	110	5.900	795
20.-30.9.	1998	Karibik, USA	Hurrikan (Georges)	4.000	10.000	3.400
26.12.	1999	Deutschland u.a.	Stürme (Lothar, Kurt, Martin)	130	11.000	5.000
12.-20.8.	2002	Deutschland u.a.	Überschwemm.	37	13.500	3.100
Juni-Aug.	2003	Mitteleuropa u.a.	Hitzewelle	55.000	13.000	<1.000
26.12.	2004	Südasien, Indonesien	Tsunami	170.000	>10.000	>1.000
25.-30.8.	2005	USA (New Orleans)	Hurrikan (Katrina)	1.322	125.000	60.000
18.-20.1.	2007	West-/Mitteleuropa	Orkan (Kyrill)	49	10.000	5.800
4.-8.6.	2007	Iran, Oman	Trop. Sturm Gonu	70	3.900	650
25.-30.6.	2007	Großbritannien	Überschwemm.	4	4.000	3.000
23.8.-5.9.	2007	Griechenland	Waldbrände	67	2.000	?
21.-24.10.	2007	USA, Kalifornien	Waldbrände	8	2.700	2.300
15.-17.11.	2007	Bangladesh, Indien	Zyklon Sidr	3.360	3.700	?

*) Auswahlkriterien: Mehr als 1000 Tote oder/und Schäden über 1000 Mill. US \$ (inflationbereinigt)

†) Versicherte Schäden; Quelle: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2006-2008