

# Mit welchen Klimaänderungen müssen wir rechnen? Eine aktuelle wissenschaftliche Übersicht zum Problem des globalen anthropogenen Klimawandels

Christian-D. Schönwiese  
Institut für Meteorologie und Geophysik / Zentrum für Umweltforschung  
der Universität Frankfurt a.M.

Vortrag beim Kolloquium „Elbeflut 2002 – Ein Menetekel?“  
Deutsche Gesellschaft Club of Rome, Hamburg, 13. Juni 2003

## 1. Klima in der Diskussion: Motivation und Fragestellungen

Die Klimatologie ist nicht nur eine ausgeprägt interdisziplinäre und lebendige Wissenschaft; Klima ist auch in der Öffentlichkeit Gegenstand heißer Diskussionen, leider nicht immer in der gebotenen Sachlichkeit und Objektivität. Wie auch immer, es gibt im wesentlichen zwei Gründe, warum sich auch die Öffentlichkeit intensiv mit dem Problemkreis Klima beschäftigt:

- Der Mensch und mit ihm alles Leben auf der Erde (Biopshäre) ist hochgradig von der Gunst des Klimas abhängig. *Daher kann es uns nicht gleichgültig sein, was mit unserem Klima geschieht.*
- Die Menschheit ist mehr und mehr dazu übergegangen, das Klima auch selbst zu beeinflussen. *Daraus erwächst uns eine besondere Verantwortung.*

Das zweite Faktum, die anthropogene Klimabeeinflussung, ist beispielsweise im Fall des Stadtklimas, das sich deutlich von Klima des Umlandes unterscheidet, offensichtlich. Auch in historischer Zeit, d.h. in den letzten Jahrtausenden, ist der Mensch durch die Umwandlung von Natur- in Kulturlandschaften, dabei insbesondere durch ausgedehnte Waldrodungen, längst zum Klimafaktor geworden, weil dadurch der Stoff- und Energiehaushalt des Systems Erdoberfläche-Atmosphäre verändert wird.

Heute denken viele, wenn von anthropogenen Klimaänderungen die Rede ist, mit Recht an den enorm angestiegenen Ausstoß klimawirksamer Spurengase („Treibhausgase“), vor allem aufgrund der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas; einschließlich Verkehr), aber auch durch Waldrodungen; beides setzt u.a. zusätzliches Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre frei, was den oben genannten Energiehaushalt nicht nur besonders wirksam, sondern prinzipiell auch global verändert. Mit welchen Klimaänderungen müssen wir rechnen, wenn dieses Experiment der Menschheit mit unserem Klima fortgesetzt wird? Sind extreme Ereignisse wie die Elbeflut (August 2002) bereits Indizien für einen solchen Klimawandel?

Diese Frage ist so einfach nicht zu beantworten. Zum einen greift der Mensch nicht nur in Form des „anthropogenen Treibhauseffektes“ in das Klimageschehen ein, sondern – neben den oben genannten Aktivitäten – beispielsweise auch durch die Anreicherung der unteren Atmosphäre mit Sulfatpartikeln (Sulfataerosol), die aus der Schwefeldioxidemission stammen. Zum anderen steht er in Konkurrenz zu vielen natürlichen Einflüssen, stellt also „nur“ einen *zusätzlichen* Klimafaktor dar. Weiterhin muss, wer in die Zukunft schauen will, erst die Vergangenheit verstehen. Und das

bedeutet beim Klima, die Klimaänderungen der Vergangenheit möglichst vollständig und genau erfassen und beschreiben, die ursächlichen Mechanismen erkennen und herausfinden, wie sie im Klimageschehen zusammenwirken. Erst darauf können dann Klimamodellprojektionen in die Zukunft aufbauen, einschließlich der Fragestellung, wie sich die künftigen Klimaänderungen ökologisch und ökonomisch-sozial auswirken werden. Schließlich müssen die Begriffe „Wetter“ und „Klima“ unterschieden werden.

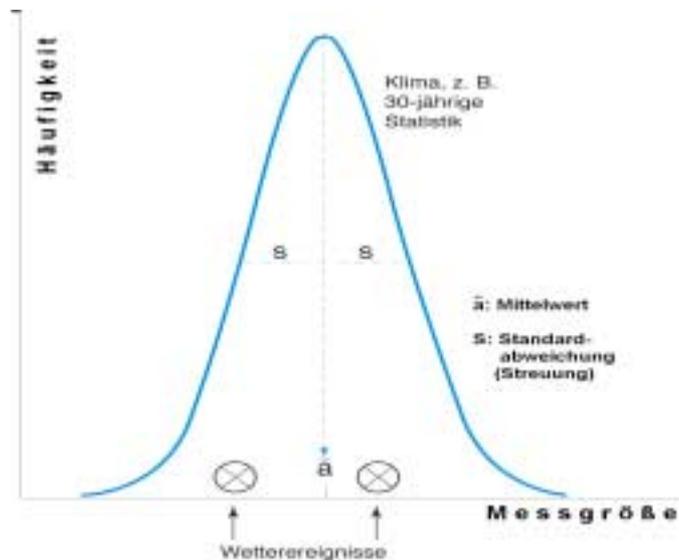


Abb. 1. Zur Unterscheidung von Wetter und Klima (vgl. Text). Bei den Parametern der Häufigkeitsverteilung (hier ist der Einfachheit halber eine Normverteilung angenommen) sind  $\bar{a}$  der Mittelwert und  $s$  die Standardabweichung (Streuung).

Ohne solche Definitionsprobleme hier vertiefen zu wollen: Der Unterschied liegt in der betrachteten zeitlichen Größenordnung (Schönwiese, 2003), die beim Wetter Stunden bis Tage, beim Klima aber viele Jahre (nach Empfehlungen der Weltmeteorologischen Organisation, WMO, mindestens 30 Jahre) bis hin zu Jahrmilliarden beträgt. Abb. 1 erläutert den Unterschied schematisch: Einzelne Temperatur- oder Niederschlagsmessungen zu einer bestimmten Zeit und einem bestimmten Ort sind Wetterereignisse; ihre systematische Erfassung über längere Zeit und die daraus resultierende statistische Beschreibung, beispielsweise in Form einer Häufigkeitsverteilung, repräsentiert das Klima, das im übrigen auch räumlich zusammengefasst bis hin zum Globalklima betrachtet werden kann. Ein irgendwo auftretendes Starkniederschlagsereignis ist demnach Wetter, die Frage, ob dies im Laufe der Jahrzehnte in einer bestimmten Region häufiger geworden ist oder werden wird, eine klimatologische.

Eine Konsequenz davon ist, dass die entsprechenden Änderungen, beispielsweise der Temperatur, beim Wetter i.a. viel größer als beim Klima, die vielleicht zunächst gering erscheinenden Klimaänderungen daher hinter den Wetteränderungen geradezu versteckt sind (da zeitliche wie auch räumliche Mittelung die Varianz verringern). Trotzdem können gerade die Klimaänderungen sehr wirksam sein. Beispielsweise ist einem Erwärmungstrend von rund einem halben Grad während der letzten rund 150 Jahre, von dem noch die Rede sein wird, etwa die Hälfte des Volumens der Alpengletscher zum Opfer gefallen (Häberli et al., 1998), während die

gleichen Gletscher von den stets überlagerten, viel heftigeren Wetteränderungen in ihrer Ausdehnung kaum Notiz nehmen. Somit sind Klimaänderungen selbst dann von Interesse, wenn sie sich nur im Bereich von einigen zehntel Grad bewegen. Außerdem sind die Ursache-Wirkung-Mechanismen ganz unterschiedlich. Schließlich laufen Wettervorgänge praktisch allein in der Atmosphäre ab, während für Klimavorgänge das gesamte Klimasystem verantwortlich ist, nämlich das Verbundsystem Atmosphäre – Hydrosphäre (Ozean und kontinentales Süßwasser) – Kryosphäre (Land- und Meereis) - Pedosphäre (Boden) - Lithosphäre (Gesteine) und Biosphäre (insbesondere Vegetation).

Im folgenden sollen nun zunächst die Klimaänderungen der Vergangenheit kurz und exemplarisch beleuchtet werden. Darauf folgt eine Ursachendiskussion, die sich allerdings auf die zeitliche Größenordnung des Industriezeitalters beschränkt. Klimamodelle unterschiedlicher Zielrichtung und unterschiedlichen Aufwands dienen dazu, diese Änderungen zu verstehen und zu simulieren. Davon ausgehend werden einige Zukunftsprojektionen vorgestellt, einschließlich möglicher sozioökonomischer Auswirkungen. Schließlich sind noch einige Konsequenzen zu ziehen.

## **2. Klima in der Vergangenheit: Änderungen in Zeit und Raum**

Klimaänderungen gibt es, seit die Erde existiert, mit positiven wie negativen Auswirkungen, und das wird auch in Zukunft so bleiben (vgl. z.B. Lozán et al., 1998; Schönwiese, 1995, 2003). Somit ist das Klima stets variabel in Zeit und Raum, die Erdgeschichte zugleich eine Geschichte des globalen wie regionalen Klimawandels. Ohne hier auf die vielfältigen, direkten und indirekten Rekonstruktionsmethoden der Klimatologie eingehen zu können: Es gibt eine schier unübersehbare Fülle von Klimadaten, einschließlich der damit verbundenen Probleme wie Fragen nach Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Repräsentanz (Schönwiese, 2003; Schönwiese und Rapp, 1997), und – mit Hilfe empirisch- mathematisch-statistischer Analysetechniken – eine noch größere Fülle von diagnostischen Erkenntnissen über die Klimavergangenheit.

Wir wissen, dass der letzte, die Erde tiefgreifend verändernde Klimawandel vor etwa 10 000 - 11 000 Jahren stattgefunden hat, als – von abrupten Variationen überlagert – das Klima der letzten „Eiszeit“ (Würm-Kaltzeit) in das noch andauernde Klima einer Warmzeit (Holozän, Postglazial) übergegangen ist, verbunden mit einem Anstieg der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur um ungefähr 4 - 5 °C (Was für das Klima ein riesiges Ausmaß bedeutet). Dieses Warmzeitklima ist, trotz durchaus auftretender Fluktuationen, deren Wirkung nicht unterschätzt werden darf, relativ stabil gewesen, was sich auf die kulturelle Entwicklung der Menschheit sicherlich günstig ausgewirkt hat. Auf diese relative Stabilität weist auch Abb. 2 hin, in der die nordhemisphärisch gemittelten jährlichen Variationen der bodennahen Lufttemperatur für die letzten 1000 Jahre (aus indirekten Rekonstruktionen mit Hilfe mehrerer paläoklimatologischer Methoden) angegeben sind. Die dick gekennzeichnete Kurve hebt die etwas langfristigeren Fluktuationen hervor, deren relative Tiefpunkte um ca. 1450, 1600, 1700 und 1800-1900 die kältesten Epochen der sog. „Kleinen Eiszeit“ kennzeichnen, die der vorausgehenden Mittelalterlichen Warmphase gefolgt sind. Dann aber fällt, ab etwa 1850/1900, eine drastische Erwärmung auf, so dass das letzte Jahrzehnt zumindest nordhemisphärisch das

wärmste in dieser Zeitspanne, mit einem bisherigen Rekordwert im Jahr 1998 (IPCC, 2001; Schönwiese, 2003), gewesen ist.

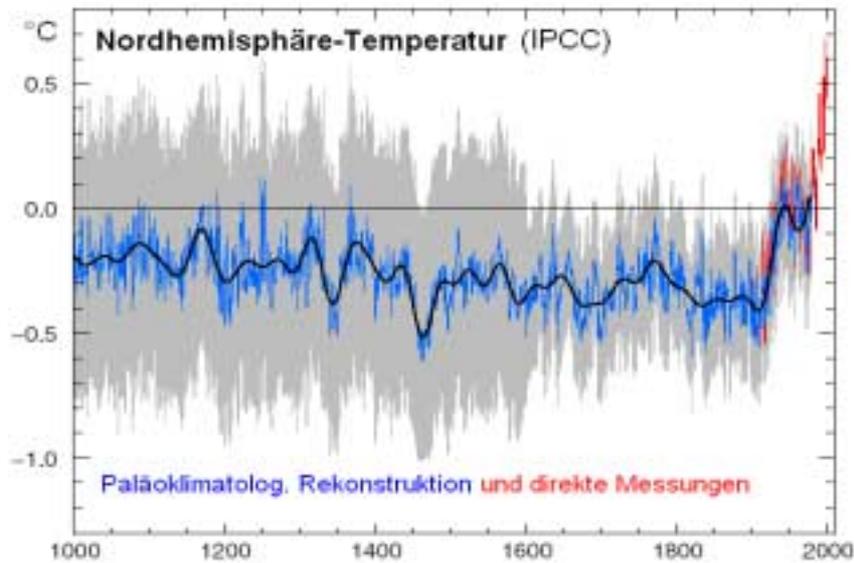


Abb. 2. Relative jährliche Variationen (Anomalien) der nordhemisphärisch gemittelten bodennahen Lufttemperatur in den letzten rund 1000 Jahren (1000-1980; nach Mann et al., 1999), abgeschätzt aufgrund verschiedener indirekter Rekonstruktionstechniken, blau, zugehörige 30-jährige Glättung, schwarz, und Vergleich mit den entsprechenden, auf direkten Messungen beruhenden Daten 1856-1998, rot (nach IPCC, 2001, verändert).

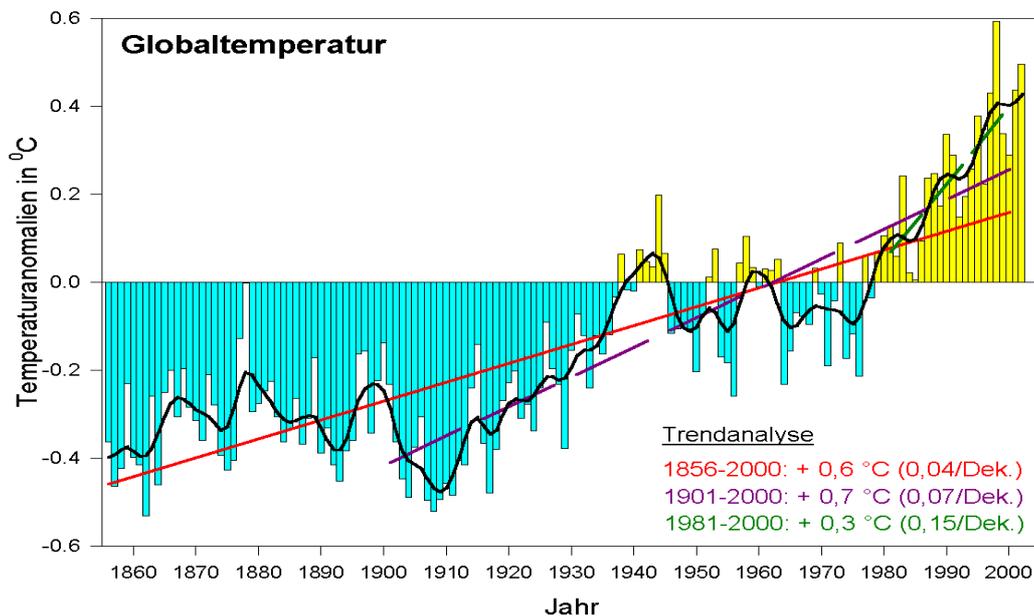


Abb. 3. Relative jährliche Variationen (Anomalien, Referenzintervall 1961-1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1856-2002 (Land- und Ozeangebiete), Säulen, 10-jährige Glättung, schwarze Kurve, und lineare Trends für die angegebenen Zeitintervalle (Datenquelle: Jones et al., 1999, bzw. IPCC, 2001, ergänzt und bearbeitet).

Es liegt daher nahe, sich diesen jüngsten Temperaturanstieg genauer anzusehen, und zwar für die Zeit ab 1856, siehe Abb. 3 (nunmehr global gemittelte bodennahe Lufttemperatur, Landgebiete und Ozeane), für die genügend viele *direkte* Messdaten für eine solche Analyse vorliegen. Wir erkennen, dass es in dieser Zeit nicht nur den bereits genannten Erwärmungstrend und Rekordwert des Jahres 1998, sondern

auch verschiedenartige überlagerte Fluktuationen gegeben hat, die im übrigen auf der Nordhemisphäre deutlich ausgeprägter als auf der Südhemisphäre sind.

Viele dieser Fluktuationen bzw. jährlichen Abweichungen vom Trend sind sicherlich natürlichen Ursprungs. So ist beispielsweise der ab 1991 vorübergehend (bis etwa 1992/93) festzustellende Temperaturrückgang von einer explosiven Vulkaneruption (Pinatubo, 1991) hervorgerufen worden, da solche Vulkanausbrüche Gase und Partikel bis in die Stratosphäre hinauf schleudern, wo sie einen Teil der Sonneneinstrahlung absorbieren (unter Erwärmung der Stratosphäre), während die dadurch verringerte Sonneneinstrahlung in die untere Atmosphäre dort zu Abkühlungseffekten führt. 1997/98 ist ein besonders starkes El-Niño-Ereignis aufgetreten (episodische Erwärmung des tropischen Ostpazifiks), das wegen seiner großräumigen Ausprägung auch in der Globaltemperatur mit einer entsprechenden Wärmeanomalie sozusagen „durchschlägt“.

Der in Abb. 3 erkennbare lineare Trend 1856-2000 beträgt rund  $0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}^1$ . Berechnet man den Trend ab 1900, so ergibt sich mit rund  $0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ein höherer Wert, was auf eine Trendverstärkung hinweist. Mit einem Wert von rund  $0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  in den letzten 20 Jahren – dies würde einem 100-jährigen Trend von  $1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  entsprechen – ist in der jüngsten Zeit nochmals eine Verstärkung eingetreten (IPCC, 2001; Schönwiese, 2002). Andererseits war der Erwärmungstrend in der Zeit ca. 1945-1975 offenbar unterbrochen, nordhemisphärisch sogar durch eine deutliche Abkühlung ersetzt.

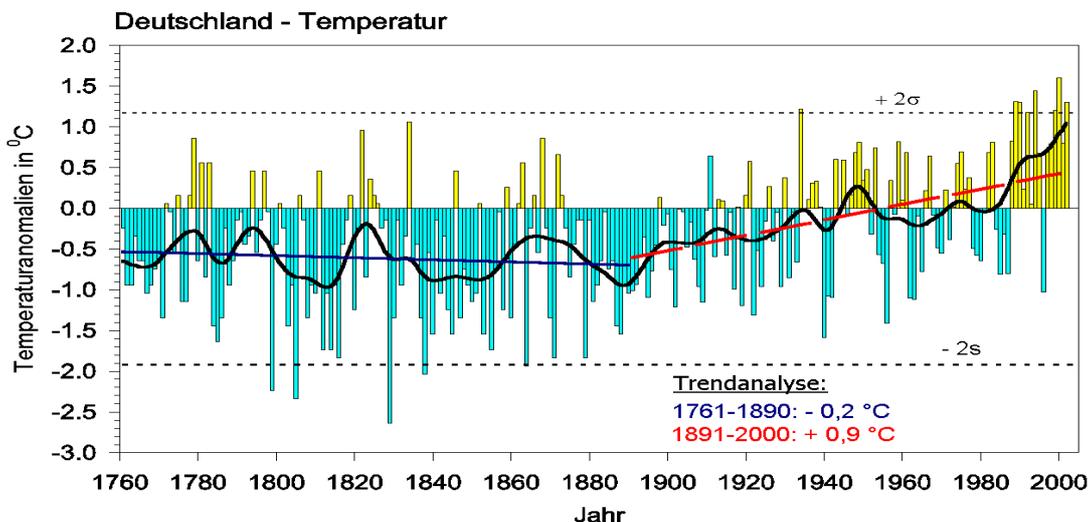


Abb. 4. Relative jährliche Variationen (Anomalien, Referenzintervall 1961-1990) der Deutschland-Mitteltemperatur 1761-2002 (nach Rapp, 2000, ergänzt; Darstellung ähnlich Abb. 3), 20-jährige Glättung und lineare Trends für die angegebenen Zeitintervalle.

Die Interpretation der beobachteten Klimaänderungen wird nun allerdings, außer ihrer komplizierten zeitlichen Struktur, noch dadurch erschwert, dass sie regional unterschiedlich ablaufen, und dies auch noch unterschiedlich in den einzelnen Jahreszeiten. So unterscheidet sich die Deutschland-Temperatur, die in Abb. 4 ab 1761 dargestellt ist, im einzelnen deutlich von der Globaltemperatur (Rapp, 2000; Schönwiese, 2002). Aber auch sie zeigt ab ca. 1890 einen deutlichen

<sup>1</sup> Bei Differenzenwerten und somit auch Trendangaben ist wissenschaftlich zwar die Maßeinheit K (Kelvin) üblich, jedoch numerisch gleich mit  $^{\circ}\text{C}$  (Grad Celsius).

Erwärmungstrend, der sogar noch höher (+ 0,9 °C) als bei der Globaltemperatur, zugleich aber auch stärker von den ausgeprägten relativ kurzfristigen Fluktuationen und Anomalien überlagert ist (typisch für Daten mit relativ kleinräumigem Bezug).

Betrachtet man lediglich die Temperaturtrends 1891-1990 (ohne die überlagerten Fluktuationen und Anomalien), global, jedoch in räumlicher Differenzierung, siehe Abb. 5, so ergibt sich ein sehr kompliziertes Bild. Zwar überwiegt offenbar die Erwärmung; sie geht aber mit regionalen Abkühlungen, beispielsweise im Bereich des Nordatlantiks oder in Zentralafrika, Hand in Hand. Wir haben es daher nicht nur mit zeitlichen, sondern auch räumlichen Strukturen der Klimaänderungen zu tun. Und nicht nur das: Die Strukturen sind auch noch jahreszeitlich unterschiedlich und die räumlichen zeitlich nicht konstant (Rapp, 2000; Schönwiese, 2002, 2003).

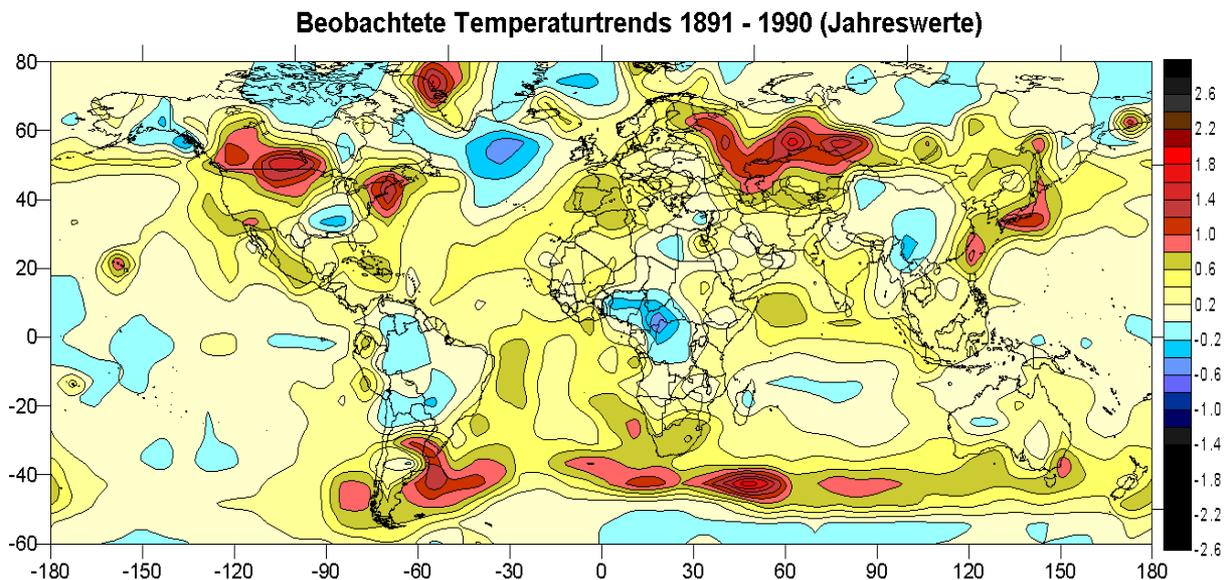


Abb. 5. Lineare Trends 1891 - 1990 der jährlichen bodennahen Lufttemperatur in °C, Globalanalyse auf der Grundlage eines 5° x 5° - Gitterpunktdatensatzes (Datenquelle: Jones et al., 1999, Bearbeitung Schönwiese, 2002).

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). Trotzdem soll in Abb. 6 auch für den Niederschlag die global-räumliche Struktur der säkularen (in diesem Fall 1900-1999) Trends angegeben werden. Dabei stehen deutlichen Niederschlagszunahmen u.a. in großen Teilen Nordamerikas, Skandinaviens, Indiens und Australiens (auch im äußersten Südosten Südamerikas) gegenläufige Trends insbesondere in Chile, der afrikanischen Sahel-Zone, dem Mittelmeergebiet, sowie Teilen Südafrikas und Südostasiens gegenüber. Auch dieses Trendbild ist aber zeitlich nicht stabil; so hat beispielsweise im Sahel in den letzten Jahrzehnten der Niederschlag wieder zugenommen. Genauere Analysen für Europa (Schönwiese und Rapp, 1997) zeigen die stärkste Zunahme im Jahresniederschlag Südkanindiens und die stärkste Abnahme im Winterniederschlag des östlichen Mittelmeergebiets (mit bis zu ca. 50 % innerhalb von 30 Jahren).

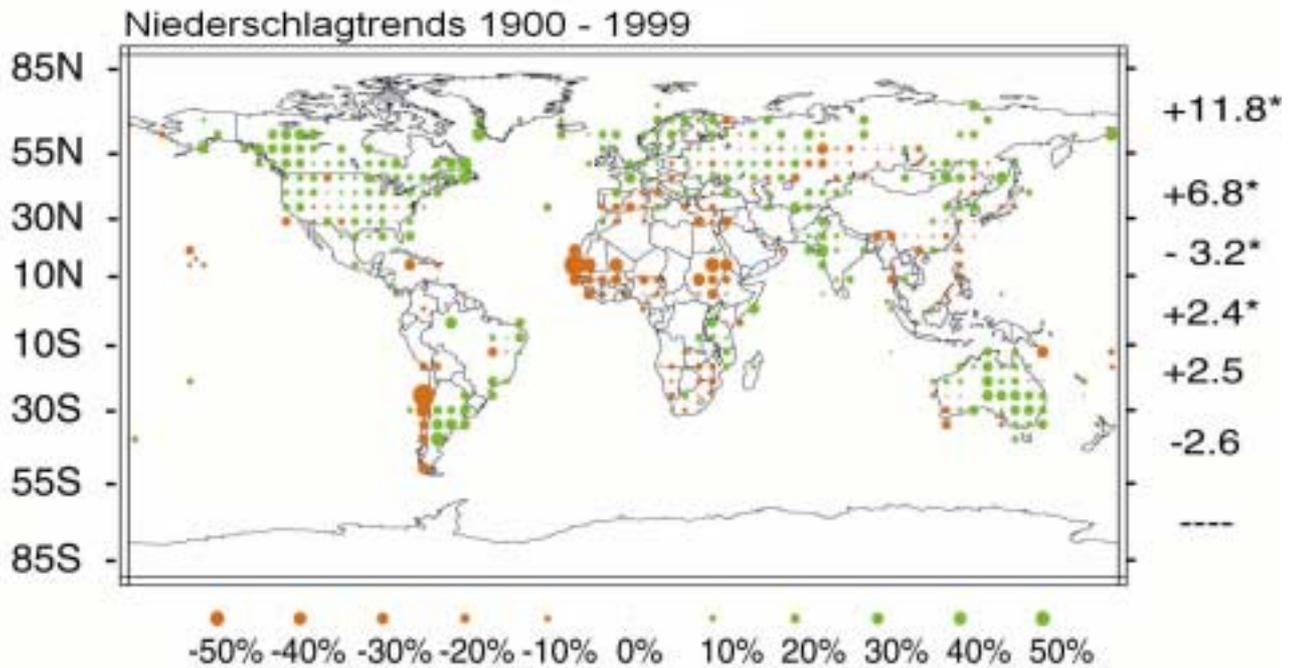


Abb. 6. Trends 1900-1999 der Jahresniederschlagssummen in Prozent, Globalanalyse (nach IPCC, 2001).

Tab. 1: Übersicht der beobachteten Temperatur- (bodennah) und Niederschlagstrends in Deutschland (Quellen: Rapp und Schönwiese, 1996; Rapp, 2000; Schönwiese, 2002).

Klimaelement	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur, 1891 - 1990	+ 0,6 °C	+ 0,7 °C	+ 1,2 °C	+ 0,8 °C	+ 0,8 °C
1961 - 1990	+ 0,8 °C	+ 0,4 °C	≈ 0	+ 1,7 °C	+ 0,7 °C
1981 - 2000	+ 1,3 °C	+ 0,7 °C	- 0,1 °C	+ 2,3 °C	+ 1,1 °C
Niederschlag, 1891 - 1990	+ 11 %	≈ 0	+ 16 %	+ 19 %	+ 9 %
1961 - 1990	- 9 %	- 8 %	+ 10 %	+ 20 %	+ 3 %
1971 - 2000	+ 13 %	+ 4 %	+ 14 %	+ 34 %	+ 16 %

Ohne auf weitere Details hier näher eingehen zu können, sind in Tab. 1 für Deutschland die beobachteten Klimatrends jahreszeitlich differenziert zusammengefasst. Säkular (1891-1990) ist dabei die Erwärmung im Herbst am stärksten gewesen. Dieses Maximum hat sich jedoch in den letzten Jahrzehnten in den Winter verlagert, wo nicht nur bei der Temperatur (Erwärmung), sondern auch beim Niederschlag (Zunahme) die höchsten Trendwerte aufgetreten sind. Beim Vergleich der 30-jährigen Zeitspannen 1961-1990 und 1971-2000 fällt beim Niederschlag eine Trendumkehr von Ab- zu Zunahme im Frühling und Sommer auf.

Während nun die relativ langfristigen Klimatrends des Industriezeitalters und auch die Grundstrukturen der Klimaänderungen vor dieser Zeit recht gut untersucht sind, gibt es noch erheblichen Forschungsbedarf bei der Frage, ob das Klima extremer geworden ist, d.h. seine Variabilität zugenommen hat. Die bisher vorliegenden

Ergebnisse deuten an, dass auch diese Frage sehr differenziert und keinesfalls schlicht mit „ja“ oder „nein“ zu beantworten ist. Beim Niederschlag, wo extreme Ereignisse in Form von Dürren oder Überschwemmungen besonders folgenschwer sind, deutet sich weltweit (IPCC, 2001) bzw. für Deutschland (Schönwiese et al., 2003) an, dass überall dort, wo er zunimmt, dies auch meist Hand in Hand mit häufigeren Extremereignissen geht. Die winterlichen Hochwässer im Rhein-Einzugsgebiet ordnen sich relativ gut in dieses Bild ein, weniger jedoch das Elbe-Hochwasser vom August 2002, weil die dortigen Pegelstände keinen systematischen Anstieg im Verlauf des Industriezeitalters erkennen lassen (Kleeberg, 1996). Zudem sind extreme Witterungsereignisse nichts neues, sondern im Verlauf der Klimageschichte zwar selten, aber immer wieder aufgetreten (Glaser, 2001). Bei Stürmen ist ein zeitlich bzw. räumlich einigermaßen einheitliches Trendverhalten gar nicht erkennbar (IPCC, 2001).

Tab. 2. Trends großer Naturkatastrophen 1960-1999 und Schäden in Mrd. US \$ (Quelle: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, G. Berz et al., 2000)

Information	A 1960-1969	B 1970-1979	C 1980-1989	D 1990-1999	Faktor D:A
Anzahl	27	47	63	87	3,2
Volkswirt. Schäden	71,1	127,8	198,6	608,5	8,6
Versicherte Schäden	6,8	11,7	24,7	109,3	16,1

Ergänzung: Ereignisklassen 1960-1997

Ereignisklasse	A	B
Erdbeben	9 %	2 %
Stürme	37 %	61 %
Überschwemmungen	46 %	36 %
Sonstiges	8 %	1 %

a = volkswirtschaftliche Schäden  
b = versicherte Schäden  
(Alle Schäden in Werten von 1999)

Allerdings ist, nun wieder global gesehen, die Versicherungs- und insbesondere Rückversicherungswirtschaft über den drastischen Anstieg witterungsbedingter Schäden alarmiert (Berz et al., 2000); vgl. Tab. 2. Auch wenn, gerade bei den versicherten Schäden, auch die zunehmende Bebauung früherer Brachflächen und die damit verbundene Wertkonzentration in gefährdeten Gebieten eine große Rolle spielen, so ist doch nicht von der Hand zu weisen, dass weltweit gesehen extreme Witterungsereignisse zugenommen haben könnten, vielleicht sogar in ihrer Häufigkeit *und* ihrem Ausmaß. Verlässlichere Indizien des globalen Klimawandels sind freilich, neben den Klimadaten selbst, beispielsweise die in den meisten Regionen der Erde sich zurückziehenden Gletscher (für die Alpen bereits erwähnt; Häberli et al., 2001) oder die polwärtige Ausbreitung wärmeliebender Pflanzen und Tiere (Rapp, 2000), teilweise auch von Schädlingen und Krankheitserregern.

### 3. Klimasteuerung: Menschliche Beeinflussung und natürliche Faktoren

Selbst wenn wir uns auf die Jahr-zu-Jahr- bis höchstens säkulare Zeitskala beschränken, müssen mindestens die in Tab. 3 zusammengestellten Mechanismen als Ursachen für Klimaänderungen ins Kalkül gezogen werden. Offenbar handelt es sich dabei sowohl auf der anthropogenen als auch der natürlichen Schiene um mehrere konkurrierende Faktoren, wobei die natürlichen Faktoren Vulkanismus und El Niño schon genannt worden sind. Hinzu kommt u.a. noch die Sonnenaktivität. Um in dieses vielfältige Bild Ordnung zu bringen, kann versucht werden, das Ausmaß der Störung des Klimasystems durch die einzelnen Faktoren abzuschätzen.

Tab. 3: Mögliche Ursachen für Klimaänderungen in der interannuären (mehrjährigen) bis säkularen (hundertjährigen) Zeitskala (Erklärung der chemischen Symbole für die Treibhausgase s. Anhang; Quelle: Schönwiese, 2003.)

Anthropogen	Natürlich
Stadtklima-Effekte (z.B. „Wärmeinsel“, Windfeld)	Explosiver Vulkanismus (stratosphärische Sulfatpartikel)
Sonstige Veränderungen der Erdoberfläche (z.B. Landwirtschaft, Verkehr)	Sonnenaktivität (Flecken, Fackeln, usw.; Sonnenpulsationen)
Troposphärische Sulfatpartikel (aus der SO <sub>2</sub> -Emission; „Kühleffekt“)	El Niño / Southern Oscillation (ENSO-Mechanismus)
„Treibhausgase“ (Emission von CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , FCKW, N <sub>2</sub> O, troposphär. O <sub>3</sub> usw.)	Nordatlantik-Oszillation (NAO) und andere Zirkulationsphänomene
Troposphärische Folgen des strato- sphärischen Ozonabbaus (gering)	Zufallsprozesse (stochastische Mechanismen)

Als grundlegende Orientierung dienen dabei die sog. Strahlungsantriebe, d.h. die Veränderung der Bilanz aus solarer Einstrahlung und terrestrischer Abstrahlung in der unteren Atmosphäre (Troposphäre, d.h. untere grob gerundet 10 km), meist in globaler Mittelung betrachtet. Eine Übersicht dazu bringt Tab. 4, wobei einer solchen Betrachtung aber nur die bereits erwähnten externen Einflüsse auf das Klimasystem zugänglich sind (nicht deren interne Wechselwirkungen) und die energetischen ( $\text{Wm}^{-2}$  = Watt pro Quadratmeter) Maßzahlen ohne Rückkopplungen gelten, d.h. ohne mögliche Verstärkungen bzw. Abschwächungen durch die internen Wechselwirkungen im Klimasystems (z.B. im Zusammenhang mit der Bewölkung).

Tab. 4: Störung des Strahlungsgleichgewichts (Strahlungsantriebe, global gemittelt, Troposphäre; (+)=Erwärmung, (-)=Abkühlung) durch die angegebenen Klimafaktoren, vorindustriell (ca. 1750) bis heute (nach IPCC, 2001; Vulkanismus nach McCormick et al., 1995), und entsprechende Temperatureffekte (Signale) nach statistischen Modellabschätzungen (neuronale Netze) für die bodennahe globale (1856-1998) bzw. deutsche (1865-1997) Mitteltemperatur (Quellen: Walter et al., 1998; Walter und Schönwiese, 1998, 2002; Walter, 2001).

Klimafaktor	Strahlungs-Antrieb	Global-Signal	Deutschl.-Signal	Signalstruktur
Treibhausgase *	(+) 2,2-2,7 Wm <sup>-2</sup>	0,9-1,3 °C	c. 1,5 °C	progressiver Trend (+)
Sulfatpartikel *	(-) 0,2-0,8 Wm <sup>-2</sup>	0,2-0,4 °C	c. 0,6 °C	variabler Trend (-) **
Vulkanismus ***	(-) max.c. 3 Wm <sup>-2</sup>	0,1-0,2 °C	c. 0,2 °C	episodisch, 1-3 Jahre (-)
Sonnenaktivität	(+) 0,1-0,5 Wm <sup>-2</sup>	0,1-0,2 °C	c. 0,6 °C	fluktuativ (+)
El Niño	-	0,2-0,3 °C	insignifikant	episodisch, Monate(+)

\*) anthropogen \*\*) insbesondere 1945 – c. 1975 ausgeprägt

\*\*\*) beim Pinatubo-Ausbruch, 1991: 2,4 Wm<sup>-2</sup>; 1992: 3,2 Wm<sup>-2</sup>; 1993: 0,9 Wm<sup>-2</sup>

Diese Vergleiche zeigen, dass der Emission klimawirksamer Spurengase durch menschliche Aktivitäten (Details s. Anhang), dem anthropogenen „Treibhauseffekt“, und dem Vulkanismus das größte Gewicht zukommt. Der zeitliche Verlauf der Störung, die sog. Signalstruktur, ist jedoch ganz unterschiedlich: Während es sich beim anthropogenen „Treibhauseffekt“ um einen systematischen und langfristigen Trend über das gesamte Industriezeitalter hin handelt, wirken sich explosive Vulkanausbrüche immer nur für wenige Jahre aus. Die Sonnenaktivität, der manche (vorwiegend Laien) ein großes Gewicht beimessen, spielt dabei nur eine geringe Rolle, was allerdings nur für die hier betrachtete zeitliche Größenordnung des Industriezeitalters gilt, nicht z.B. für das letzte Jahrtausend, wo der Einfluss der Sonnenaktivität sogar dominierend war (Mann et al., 1999).

Die Wirkung der „Treibhausgase“ dürfte weithin bekannt sein, so dass hier eine kurze Auflistung der wesentlichen Tatsachen genügen mag (vgl. Anhang; weitere Details s. IPCC, 2001; Cubasch und Kasang, 2000; Schönwiese, 2003).

- „Treibhausgase“ wie H<sub>2</sub>O (Wasserdampf), CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid), CH<sub>4</sub> (Methan) usw. haben die Eigenschaft, die von der Erdoberfläche ausgehende Strahlung stärker zu absorbieren als die Sonneneinstrahlung, was wie eine Art Wärmefalle wirkt: Nehmen die atmosphärischen Konzentrationen solcher Gase zu, wird die untere Atmosphäre (Troposphäre) wärmer, die darüber liegende Stratosphäre kälter.
- Der Mensch emittiert derzeit pro Jahr rund 30 Gt (Millarden Tonnen) CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre, wovon rund 75% auf die Nutzung fossiler Energieträger zurückgehen (Kohle, Erdöl und Erdgas, einschließlich aller Sekundäreffekte wie Verkehr), rund 20% auf Waldrodungen und rund 5% auf die Brennholznutzung in den Entwicklungsländern.
- Diese Emission ist im Lauf des Industriezeitalters enorm angestiegen, was mit dem Anstieg der Weltprimärenergienutzung zusammenhängt: seit 1900 in etwa um den Faktor 12-14 auf derzeit rund 15 Gt SKE (zum Vergleich liegt der Anstieg der Weltbevölkerung in dieser Zeit „nur“ beim Faktor 3 auf derzeit rund 6 Mrd. Menschen).
- Obwohl es im Rahmen des globalen Kohlenstoffkreislaufs Puffermechanismen gibt, so der Ozean jährlich etwa die Hälfte des zusätzlichen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Ausstosses aufnimmt, kommt es zu einer Anreicherung der Atmosphäre mit CO<sub>2</sub>, siehe Abb. 7, und zwar von vorindustriell ca. 280 ppm (gilt annähernd für die letzten ca. 10 000 Jahre) auf derzeit über 370 ppm (Mauna-Loa-Jahreswert 2001: 370,9 ppm). Eine so

hohe Konzentration hat es sicherlich in den letzten ca. 400 000 Jahren nicht gegeben, wahrscheinlich sogar nicht in den letzten 20 Jahrmillionen.

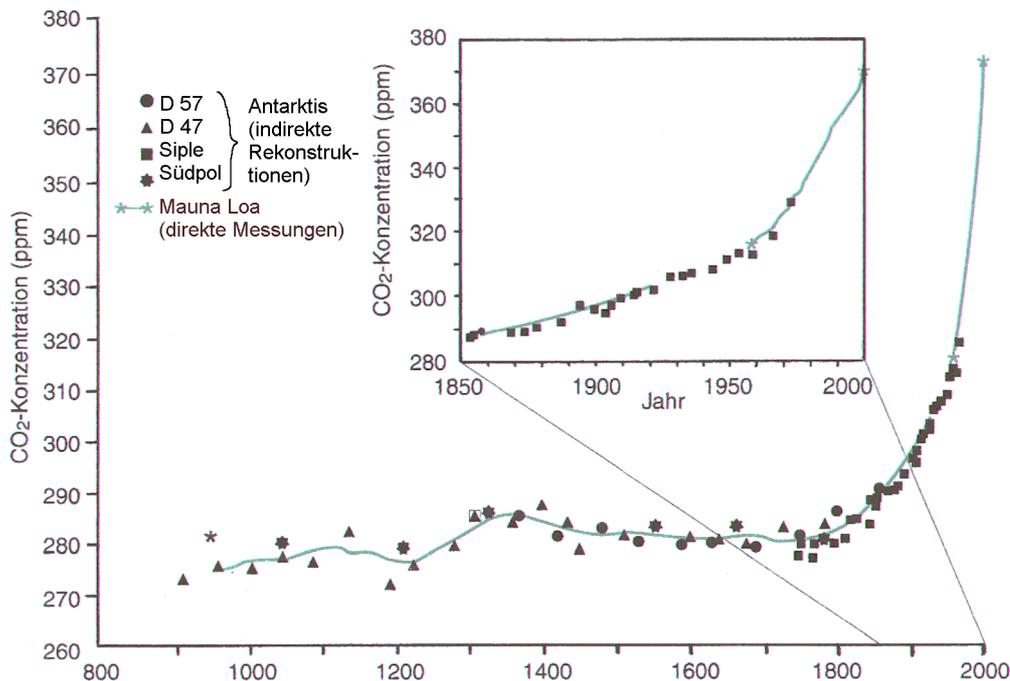


Abb. 7: Rekonstruktion der atmosphärischen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) - Konzentration für die letzten rund 1100 Jahre nach Eisbohrungen in der Antarktis (verschiedene Symbole, welche die Messstationen kennzeichnen), 100jährige Glättung (ausgezogene Kurve) und direkte jährliche Messdaten vom Mauna Loa, Hawaii, 1958-2000 (mit \* markierte ausgezogene Kurve; Zusammenstellung nach IPCC, 1996, 2001, aktualisiert und verändert).

Schon dies zeigt sehr deutlich, dass solche Eingriffe der Menschheit das Klimasystem nachhaltig stören. Bevor daraus aber definitive Schlüsse gezogen werden können, ist noch zu klären, wie sich dieser Einfluss auf das Klimageschehen auswirkt und wie die Konkurrenzsituation zu den natürlichen Klimafaktoren aussieht. Nur am Rande sei erwähnt – obwohl es in der Öffentlichkeit dabei immer wieder Missverständnisse gibt – dass der natürliche Treibhauseffekt zum größten Teil (ca. 60%) auf H<sub>2</sub>O zurückgeht, der zusätzliche anthropogene, um den es hier geht, jedoch hauptsächlich auf CO<sub>2</sub> (zufällig ebenfalls ca. 60%, vgl. Anhang), da der Mensch mit der Weltozeanverdunstung auch nicht annähernd konkurrieren kann. *Indirekt* spielt, wegen des wärmer werdenden Ozeans und der deswegen ansteigenden Verdunstung, H<sub>2</sub>O aber doch auch beim menschlichen Einfluss eine Rolle (IPCC, 2001).

#### 4. Klimaverständnis: Modellsimulationen und statistische Abschätzungen

Um die Effekte nun im einzelnen zu verstehen und abzuschätzen, einschließlich der damit verbundenen Wechselwirkungen und Rückkopplungen im Klimasystem, wird eine ganze Hierarchie von Modellen eingesetzt, um in Form einer Kette folgende Fragen zu beantworten (Cubasch und Kasang, 2000; IPCC, 2001; Schönwiese, 2003):

- Welche Anteile der (in Vergangenheit bzw. Zukunft) emittierten Treibhausgase verbleiben in der Atmosphäre und erhöhen dort deren Konzentration (→ Stoff-Flussmodelle)?
- Wie sieht die Klimareaktion darauf aus (→ Klimamodelle im engeren Sinn)?
- Welche ökologischen bzw. sozioökonomischen Folgen resultieren daraus (→ sog. Impaktmodelle)?

Und selbst bei den Klimamodellen im engeren Sinn – die übrigens, ganz im Gegensatz zu den Wettermodellen, nie atmosphärische Einzelkonstellationen vorhersagen können, sondern nur deren Statistik, zudem im Sinn einer bedingten Aussage – gibt es äußerst unterschiedliche Ansätze: physikalische bzw. physikochemische Modelle (s. z.B. Cubasch und Kasang, 2000) mit relativ geringem (z.B. Energiebilanzmodelle) bis zu sehr großem Aufwand (gekoppelte atmosphärisch-ozeanische Zirkulationsmodelle) sowie statistische Modelle (vor allem Regressionen und neuronale Netze), die der empirischen, d.h. allein auf Beobachtungsdaten basierenden Entwicklung ursächlicher Hypothesen dienen (s. z.B. Schönwiese, 2003).

Lange Zeit haben sich die Klimamodellierer auf Zukunftsprojektionen konzentriert und, gerade mit aufwendigen physikalischen Klimamodellen, nur selten in die Vergangenheit geblickt. Im letzten Jahrzehnt hat sich das geändert und es gehört zu den wichtigsten Fortschritten der Klimaforschung, dass seit 1995 auch die kombinierten Wirkungen des anthropogenen „Treibhaus-“ und „Kühl“-Effektes der Vergangenheit mit aufwendigen Klimamodellrechnungen abgeschätzt worden sind. Der anthropogene „Kühleffekt“ geht auf die Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) - Emission zurück, die in der unteren Atmosphäre (Troposphäre) zur Bildung von Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) - Partikeln und in der veränderten Bilanz aus solarer Einstrahlung und terrestrischer Ausstrahlung zur Abkühlung der bodennahen Atmosphäre führt (vgl. dazu Tab. 4).

Die bisher durchgeführten derartigen aufwendigen (auf physikalischen Gleichungen beruhenden) Modellrechnungen, für die Abb. 8 ein Beispiel bringt, zeigen, dass seit ungefähr 1860 dem anthropogenen Zusatz-„Treibhauseffekt“ ein Anstieg der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur um ungefähr  $1\text{ °C}$  zugeschrieben werden kann, abzüglich des kühlenden Sulfateffektes sind es etwa  $0,6\text{ °C}$ , in guter Übereinstimmung mit dem tatsächlich beobachteten Trend. Allerdings ist es zumindest beim großen Aufwand solcher Modelle, welche die atmosphärische und ozeanische Zirkulation gekoppelt simulieren, nicht möglich, in vertretbaren Rechenzeiten auch die wichtigsten natürlichen Faktoren simultan mitzuführen. Doch der wesentlich geringere Aufwand empirisch-statistischer Modelle lässt dies zu, z.B. mit Hilfe des Prinzips der neuronalen Netze, wobei hier als weitere Klimafaktoren der Vulkanismus, die Sonnenaktivität und das El-Niño-Phänomen mit berücksichtigt werden sollen (vgl. dazu erneut Tab. 4).

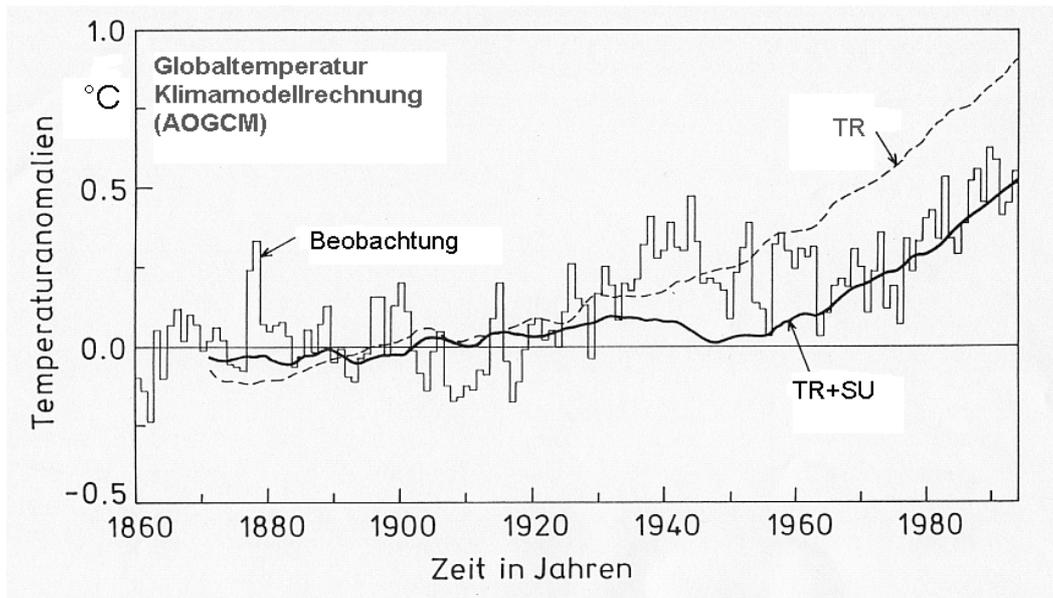


Abb. 8: Vergleich der beobachteten Jahresanomalien der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur (entsprechend Abb. 3) 1860-1994 mit einer Klimamodellrechnung (atmosphärisch-ozeanisches Zirkulationsmodell AOGCM; Mitchell et al., 1995, bzw. IPCC, 1996), in der die Wirkung des anthropogenen Treibhauseffektes (TR) allein bzw. in Kombination mit dem ebenfalls anthropogenen Sulfatpartikeleffekt (TR + SU) simuliert worden ist.

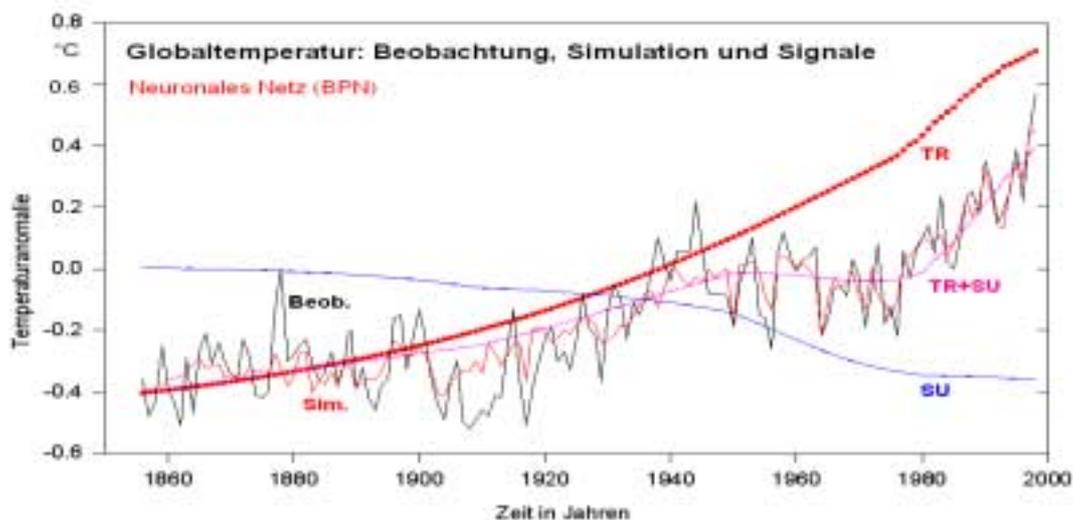


Abb. 9: Vergleich der beobachteten Jahresanomalien der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1856-1998 (entsprechend Abb. 2), schwarz, Reproduktion durch ein neuronales Netz (Backpropagation), dünne rote Kurve, das gemäß Tab. 4 den anthropogenen Treibhaus- (TR) sowie Sulfateffekt (SU) und weiterhin die natürlichen Faktoren Vulkanismus, Sonnenaktivität und El Niño enthält, und zugehörige TR-, SU- und (TR+SU) - Signalzeitreihen (hier Bestschätzungen +1.1 °C bzw. -0.4 °C bzw. +0.8 °C), welche die Entwicklung des anthropogenen Anteils dieser Klimaänderungen angeben (nach Walter, 2001, vgl. auch Walter und Schönwiese, 2002).

Nun lassen sich auch die Jahr-zu-Jahr-Variationen der Temperatur gut reproduzieren, vgl. Abb. 9, zwar nicht perfekt, aber doch mit einer Varianzerklärung<sup>2</sup> von ca. 80 %. Besonders bemerkenswert aber ist, dass auch bei dieser gänzlich

<sup>2</sup> Diese Varianz, welche auf den jeweils betrachteten Einflussfaktor zurückgeht, ist gleich dem quadratischen Korrelationskoeffizienten und wird üblicherweise prozentual ausgedrückt.

anderen Art der Modellierung wiederum herauskommt, dass der Anteil des anthropogenen „Treibhauseffektes“ bisher (Industriezeitalter) bei etwa 1 °C Erwärmung liegt (wieder in Form eines langfristigen Trends) und sich bei Hinzunahme des anthropogenen „Kühleffektes“ durch die niederatmosphärischen Sulfatpartikel wiederum eine Verminderung dieses Temperaturanstiegs auf den beobachteten Wert von etwa 0,6 °C ergibt. Die natürlichen „Klimasignale“ sind nach diesen Abschätzungen demgegenüber relativ klein sowie episodisch bzw. fluktuativ, haben also zu dem Langfristtrends der letzten 100 Jahre kaum beigetragen, vgl. erneut Tab. 4 und Abb. 9, wobei in Tab. 4 auch ersichtlich ist, dass diese empirisch-statistisch abgeschätzten anthropogenen wie natürlichen Klimasignale der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur in guter Übereinstimmung mit den auf physikalischer Grundlage ermittelten direkten globalen Strahlungsantrieben der Troposphäre (unteren Atmosphäre) stehen.

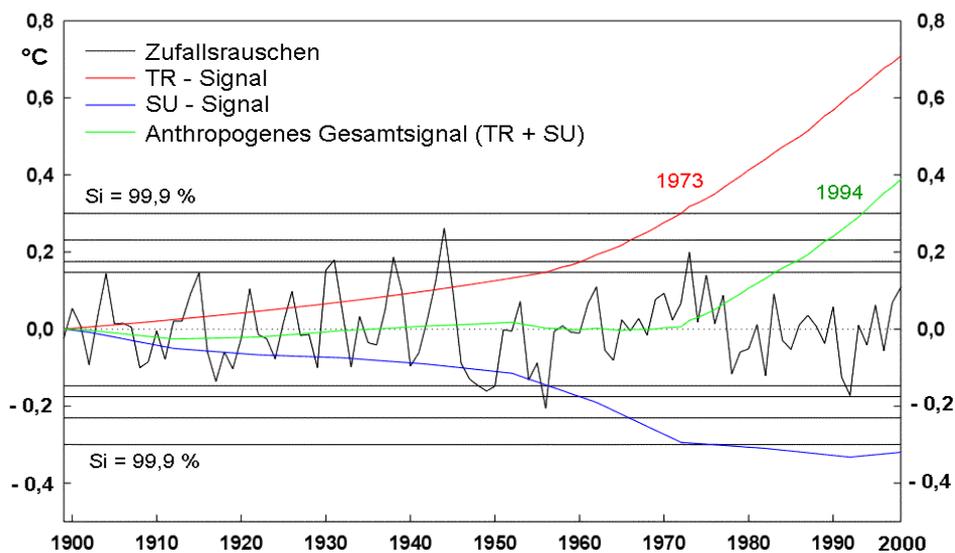


Abb. 10. „Zufallsrauschen“ der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur, Jahresdaten 1900 - 1998, nachdem alle erkläraren (vgl. Abb. 9) Varianzanteile mittels sukzessiver Regression von den Originaldaten subtrahiert worden sind, zugehörige Signifikanzschwellen und (ähnlich Abb. 9) anthropogene TR-, SU- und (TR+SU) - Signalzeitreihen (nach Grieser et al., 2000).

Von den relativ kurzfristigen vulkanisch bedingten Abkühlungseffekten abgesehen (negativer Strahlungsantrieb), kommt dem anthropogenen „Treibhauseffekt“ sowohl was das Ausmaß des (positiven) Strahlungsantriebs als auch was die Reaktion der Globaltemperatur betrifft, offenbar bereits in der Vergangenheit das größte Gewicht zu. Die beispielsweise von der Sonnenaktivität hervorgerufenen Effekte sind demgegenüber in etwa um den Faktor 10 geringer, was auch deswegen verständlich ist, weil die Satellitenmessungen außerhalb der Atmosphäre entsprechende (fluktuative) Ausstrahlungsvariationen der Sonne nur im Promillebereich der sog. Solarkonstanten<sup>3</sup> anzeigen. Zieht man, wiederum auf empirisch-statistischem Weg, in diesem Fall über sukzessive Regressionen, sozusagen alle Variationsanteile von den Beobachtungsdaten der Globaltemperatur ab, die sich bestimmten anthropogenen bzw. natürlichen Ursachen zuordnen lassen (entsprechend Tab. 4), und vergleicht das Residuum, das dann wahrscheinlich überwiegend einen Zufallsprozess repräsentiert, mit der zeitlichen Entwicklung des anthropogenen

<sup>3</sup> Mittlere solare Einstrahlung am Außenrand der Erdatmosphäre.

„Treibhaus“-Signals, so ergibt sich, dass sich dieses Signal ab dem Jahr 1973 mit einer Wahrscheinlichkeit von über 99,9 % vom „Zufallsrauschen“ abhebt, vgl. Abb. 10, somit entsprechend signifikant nachgewiesen ist (Grieser et al., 2000).

## 5. Klimazukunft: Szenarien und Modellprojektionen

Aufgrund dieser Indizien und Interpretationen der Klima-Vergangenheit gewinnen die Klimamodellprojektionen in die Zukunft erheblich an Brisanz. Wenn wir dabei verschiedene Szenarien zugrundelegen, die von einer ungebremsten Entwicklung bis hin zu Klimaschutzmaßnahmen reichen, so ist nach IPCC-Abschätzungen (IPCC, 2001) bis zum Jahr 2100 gegenüber 1990 ein weiterer Anstieg der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur um 1,4 - 5,8 °C zu erwarten; somit liegt selbst die untere Schwelle dieser Unschärfe der Modellschätzungen oberhalb der Obergrenze der entsprechenden natürlichen Klimavariationen der letzten 10 000 Jahre, hinsichtlich der letzten 1000 Jahre (vgl. Abb. 2) sogar ganz erheblich. Das bedeutet, trotz aller Unsicherheiten, dass ein sehr großes Risiko weiterer anthropogener globaler Klimaänderungen großen Ausmaßes besteht.

Aufwendige, physikalisch orientierte Klimamodelle sind nun auch in der Lage, die regional-jahreszeitlichen Reaktionen des Klimasystems anzugeben, und dies bezüglich aller relevanten Klimatelemente. Tab. 5 stellt diese Ergebnisse in einer groben Übersicht zusammen. Dabei fällt auf, dass sich einige dieser Projektionen bereits in den Trends der Beobachtungsdaten widerspiegeln. So sind beispielsweise nicht nur die globale Erwärmung, sondern auch die stratosphärische Abkühlung und der Meeresspiegelanstieg (im globalen Mittel der letzten 100 Jahre 10 - 25 cm) auch Beobachtungsfakten. Es sei aber angemerkt, dass alle diese Rechenergebnisse, trotz des großen Aufwandes, prinzipiell quantitative Unschärfen sowie regionale Unsicherheiten beinhalten.

Tab. 5: Auflistung der wichtigsten Klimamodell-Zukunftsprojektionen zum „anthropogenen Treibhauseffekt“ (in Anlehnung an IPCC, 2001).

- Erwärmung der unteren Atmosphäre (global bis 2100 um 1,4-5,8 °C; Maxima vermutlich im subarktischen Winter, in Mitteleuropa ebenfalls im Winter)
- Abkühlung der Stratosphäre (mit Begünstigung des dortigen Ozonabbaus)
- Niederschlagsumverteilungen (beispielsweise Mittelmeerregion generell trockener, Mitteleuropa im Sommer trockener und im Winter feuchter, Südkandinavien sowie Polargebiete generell feuchter)
- Meeresspiegelanstieg (bis 2100 um c. 10-90 cm; aufgrund der thermischen Ausdehnung des oberen Ozeans und des Rückschmelzens außerpolarer Gebirgsgletscher)
- Möglicherweise häufigere Extremereignisse wie Hitzewellen und Dürreperioden, aber auch Gewitter-, Hagel- und Starkniederschlagsepisoden (regional unterschiedlich), tropische Wirbelstürme, Tornados u.a. (dies im einzelnen aber sehr unsicher)

Trotz aller Einschränkungen ist die Situation mit einem Experiment vergleichbar, das die Menschheit mit dem Klima und somit unserer Umwelt durchführt. Der Ausgang ist aber nicht ungewiss, sondern aufbauend auf den Interpretationen der Vergangenheit liefern die Klimamodelle durchaus Aussagen über die in Zukunft zu erwartenden Risiken anthropogener Klimaänderungen. Dazu kommen noch die in

Tab. 6 zusammengestellten möglichen Auswirkungen, die zum größten Teil negativ sind.

Tab. 6: Mögliche positive (+) bzw. negative (-) Auswirkungen anthropogener Klimaänderungen.

- |  |
|--|
| <p>+ Weniger Heizbedarf in der gemäßigten (Winter) und subpolaren Klimazone</p> <p>+ Weniger Kältestress in der gemäßigten (Winter) und subpolaren Klimazone</p> <p>+ Längere Vegetationsperiode und bessere landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten in der gemäßigten Klimazone (günstige Boden- und Wasserbedingungen vorausgesetzt)</p> <p>...</p> <p>- „Fehlreaktionen“ von Ökosystemen (z.B. Blattaustrieb in warmen Wintern)</p> <p>- Günstigere Ausbreitungsbedingungen für Pflanzenschädlinge und Krankheitserreger</p> <p>- Überflutung von Inselstaaten und Flussdeltagebieten (durch Meeresspiegelanstieg)</p> <p>- Sommerliche Hitzewellen in der gemäßigten, subtropischen und tropischen Klimazone</p> <p>- Regionale Wasserversorgungsprobleme (z.B. in der Mittelmeerregion)</p> <p>- Regional häufigere Überschwemmungen (z.B. in der gemäßigten Klimazone, Winter)</p> <p>- Mehr Sturmschäden (?)</p> <p>...</p> |
|--|

## 6. Konsequenzen: Klimaschutz und Klimaforschung

Folgende Konsequenzen ergeben sich aus dieser kurzen klimawissenschaftlichen Bestandsaufnahme:

- Es kann kein Zweifel daran bestehen, dass der Mensch durch die zusätzliche Emission bestimmter Gase das Klima weltweit ändert.
- Im Vergleich mit natürlichen Klimaänderungen ist insbesondere die globale Erwärmung der letzten Jahrzehnte höchstwahrscheinlich menschengemacht.
- Auch wenn es im Detail (quantitativ, regional) erhebliche Unsicherheiten gibt, so ist dies doch mit Änderungen sämtlicher Klimaelemente verbunden, möglicherweise auch mit (regional) häufigeren Extremereignissen.
- Daraus erwächst uns für die Zukunft ein großes Risiko.
- Baldiger, effektiver und ausgewogener Klimaschutz ist somit notwendig.

Die Diskussion darüber, wie die Klimaschutzmaßnahmen im einzelnen aussehen sollten, ist schon seit einiger Zeit ausführlich geführt worden und demzufolge hat u.a. die sog. „Klima“-Enquete-Kommission des Deutschen Bundestags (1995) Empfehlungen für eine entsprechende Klimaschutzpolitik gegeben. Dabei steht die Forderung nach CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen, insbesondere durch Maßnahmen im Energiesektor, im Vordergrund.

International ist bei der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (Rio de Janeiro, 1992) das Rahmenübereinkommen über Klimaänderungen, kurz Klimakonvention, beschlossen worden, das seit 1994 völkerrechtlich verbindlich ist. In seiner Kernaussage lautet es:

<p>„Das Endziel dieses Übereinkommens ... ist es, ... die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf</p>
---

dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann.“

Dies ist zwar ein wichtiges und großes Ziel, aber zunächst sehr weich und wenig definitiv formuliert. Darum gibt es seit 1995 im jährlichen Turnus sog. Vertragstaatenkonferenzen, um die UN-Klimakonvention mit Leben zu füllen. Zur Zeit steht aber noch die Ratifizierung des bei der dritten Vertragsstaatenkonferenz (Kyoto, 1997) verabschiedeten Protokolls aus, das seitens der Industriestaaten eine Reduzierung einer Gruppe von „Treibhausgasen“ um 5,2 % gegenüber 1990 bis 2008-2012 vorsieht. Trotz des Ausscherens der USA wäre diese Ratifizierung möglich, wenn die GUS nicht noch zögern würde.

Längerfristig ist zur Stabilisierung des Klimas allein beim CO<sub>2</sub> nach IPCC-Schätzungen mindestens eine Halbierung der Emissionen erforderlich, was für die Industrieländer nach Meinung der „Klima“-Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages (1995) 80% bedeutet. Obwohl vielen das Problem technologisch lösbar erscheint, sogar das längerfristige, und zwar insbesondere durch geeignete Weichenstellungen im Energiebereich (CO<sub>2</sub>-freie bzw. -arme Energieträger, sparsamere und effizientere Energienutzung allgemein), muss den Klimatologen die Zurückhaltung bei der politischen Umsetzung, insbesondere was den internationalen Rahmen betrifft, beunruhigen.

Auch die Forderung nach weiterer intensiver Klimaforschung drängt sich in diesem Zusammenhang auf, weil wir noch längst nicht genau genug die Klimavergangenheit verstehen und der ursächlichen Interpretation durch Klimamodelle wie empirisch-statistische Methoden Grenzen gesetzt sind. Besonders dringlich ist dabei das Problem extremer Wetter- und Witterungsereignisse und deren klimatologischer Trends. Andererseits reicht das derzeitige Wissen durchaus aus, um wirkungsvollen Klimaschutz – abwehrend und vorsorgend – zu treffen.

## Literatur

- Berz, G., et al., 2000: Naturkatastrophen 1999. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Topics 2000, Eigenverlag, München.
- BMU (Bundesumweltministerium), 1993: Umweltpolitik. Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung. Dokumente (Klimakonvention usw.). Eigenverlag, Bonn.
- 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.
- Fritz, P., Huber, J., Levi, W. (Hrsg.), 1995: Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive. Edition UNIVERSITAS, S. Hirzel, Stuttgart
- Glaser, R., 2001: Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Primus + Wiss. Buchges., Darmstadt.
- 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 a.M.

- Häberli, W., et al., 2001. Glaciers as key indicator of global climate change. In Lozán, J.L., et al. (eds.): Climate of the 21st century: Changes and Risks. Wiss. Auswertungen + GEO, Hamburg, pp. 212-220.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton, J.T., et al., eds.), 2001: Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. University Press, Cambridge (dort auch IPCC-Berichte 1990, 1996).
- Jones, P.D., et al., 1999: Surface air temperature and its changes over the past 150 years. Rev. Geophys., 37, 173-199 (update via INTERNET: <http://www.cru.uea.ac.uk>).
- Kiehl, J.T., Trenberth, K.E., 1997: Earth's annual global mean energy budget. Bull. Am. Meteorol. Soc., 78, 197-208.
- Kleeberg, H.-B., 1996: Hochwassertrends in Deutschland. Universität der Bundeswehr, Institut für Wasserwesen, München, Heft 56a, S. 155-167.
- Lozán, J.L., Graßl, H., Hupfer, P. (Hrsg.), 1998: Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. 465 S., Wissenschaftliche Auswertungen + GEO, Hamburg; engl. überarbeitete Ausgabe 2001.
- Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K., 1999: Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties and limitations. Geophys. Res. Letters, 26, 759-762.
- McCormick, P.M., Thomason, L.W., Trepte, C.E., 1995: Atmospheric effects of Mt Pinatubo eruption. Nature, 373, 399-404.
- Mitchell, J.F.B., et al., 1995: Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. Nature 376, 501-504.
- Rapp, J., 2000: Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Bericht Nr. 212, Deut. Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach.
- Rapp, J., Schönwiese, C.-D., 1996: Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurter Geowiss. Arb., Serie B, Band 5, Univ. Frankfurt a.M.
- Schönwiese, C.-D., 1995: Klimaänderungen. Daten, Analysen, Prognosen. Springer, Berlin.
- Schönwiese, C.-D., 2002: Beobachtete Klimatrends im Industriezeitalter. Ein Überblick global/Europa/Deutschland. Bericht Nr. 106, Inst. Meteorol. Geophys. Univ. Frankfurt a.M.
- Schönwiese, C.-D., 2003: Klimatologie. 2. Aufl., Ulmer (UTB), Stuttgart.
- Schönwiese, C.-D., Grieser, J., Trömel, S., 2003: Secular change of extreme precipitation months in Europe. Theor. Appl. Climatol., in print.
- Schönwiese, C.-D., Rapp, J., 1997: Climate Trend Atlas of Europe Based on Observations 1891 - 1990. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.
- Walter, A., 2001: Zur Anwendung neuronaler Netze in der Klimatologie. Bericht Nr. 218, Deut. Wetterdienst, Selbstverlag, Offenbach.
- Walter, A., Denhard, M., Schönwiese, C.-D., 1998: Simulation of global and hemispheric temperature variations and signal detection studies using neural networks. Meteorol. Z., N.F., 7, 171-180.
- Walter, A., Schönwiese, C.-D., 1999: Ursachen der Lufttemperaturvariationen in Deutschland 1865-1997. In Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Klimastatusbericht 1998, Offenbach, S. 23-29.
- Walter, A., Schönwiese, C.-D., 2002: Attribution and detection of anthropogenic climate change using a backpropagation neural network. Meteorol. Z., 11, 335-343.

*Anhang: Übersicht der wichtigsten Charakteristika der „Treibhausgase“ mit Emissionen und Konzentrationen (jeweils 2000, vorindustrielle Konzentrationen in Klammern) sowie Abschätzung der Beiträge zum natürlichen (vorletzte Spalte) bzw. anthropogenen Treibhauseffekt (letzte Spalte) (Quellen: IPCC, Houghton et al., 2001; Lozán et al., 1998; natürlicher Treibhauseffekt nach Kiehl und Trenberth, 1997)*

<b>Spurengas, Symbol</b>	<b>Anthropogene Emissionen</b>	<b>Atmosphärische Konzentrationen</b>	<b>Treibh. natürlich</b>	<b>Treibh. anthrop.</b>
--------------------------	--------------------------------	---------------------------------------	--------------------------	-------------------------

Kohlendioxid, CO <sub>2</sub>	30 Gt /Jahr	370 (280) ppm	26 %	61 %
Methan, CH <sub>4</sub>	400 Mt /Jahr	1,7 (0,7) ppm	2 %	15 %
FCKW *	0,4 Mt /Jahr	F12: 0,5 (0) ppb	-	11 %
Distickstoffoxid, N <sub>2</sub> O	15 Mt /Jahr	0,31 (0,28) ppm	4 %	4 %
Ozon (bodennah), O <sub>3</sub> **	0,5 Gt /Jahr (?)	25 ppb	< 8 % ***	< 9 % ***
Wasserdampf, H <sub>2</sub> O **	rel. Gering	2,6 (2,6) %	60 %	(indirekt)

\*) Fluorchlorkohlenwasserstoffe \*\*\*) bodennaher Mittelwert \*\*\*\*) mit weiteren Gasen  
Gt = Milliarden Tonnen, Mt = Millionen Tonnen; ppm = 10<sup>-6</sup>, ppb = 10<sup>-9</sup> Volumenanteile

*Aufschlüsselung der anthropogenen Emissionen:*

CO <sub>2</sub> : 75% fossile Energie, 20% Waldrodungen, 5% Holznutzung (Entwicklungsländer)
CH <sub>4</sub> : 27% fossile Energie, 23% Viehhaltung, 17% Reisanbau, 16% Abfälle (Müll, Abwasser), 11% Biomasse-Verbrennung, 6% Tierexkremete
FCKW: Treibgas in Spraydosen, Kältetechnik, Dämm-Material, Reinigung
N <sub>2</sub> O: 23-48% Bodenbearbeitung (einschl. Düngung), 15-38% chemische Industrie, 17-23% fossile Energie, 15-19% Biomasse-Verbrennung
O <sub>3</sub> : indirekt über Vorläufersubstanzen wie z.B. Stickoxide (NO <sub>x</sub> , u.a. Verkehrsbereich)